*

熊谷寛夫

原子力

エネルギー革命を追って

筑摩総合大学

*

筑摩書房

原子力＝エネルギー革命を追って

著者のことば＝人類が消費するエネルギーは、年を追うにつれて増加し、ある推定によれば、今後一〇〇年間の必要量の六〇％は原子力に頼らねばならぬという。ここに原子力の問題の重要性がある。原子力がなければ人類の将来は心細いのである。こうして、原子力を多量に駆使するために、今後、その利用方法や技術に大きな変化が起ってくるであろう。いわゆるエネルギー革命である。そして、原子力を真に人類の福祉に結びつけるためには、この「革命」の実態をわれわれが知識としてしっかりつかんでおくことがますます大切になるであろう。

本書では、単に原子力のみでなく、ギリシア時代から今日に至るまでの物質構造、原子構造の研究の歴史にふれながら、原子力をとりまく物理学や化学の基本的概念をも明らかにした。つまり、核分裂反応や核融合反応の原理とその利用の可能性、原子力利用に必然的に伴う放射線の問題等をも併せて、エネルギー革命を原理的な面から解明することがねらいなのである。

＊

筑摩総合大学

別所照彦

＊

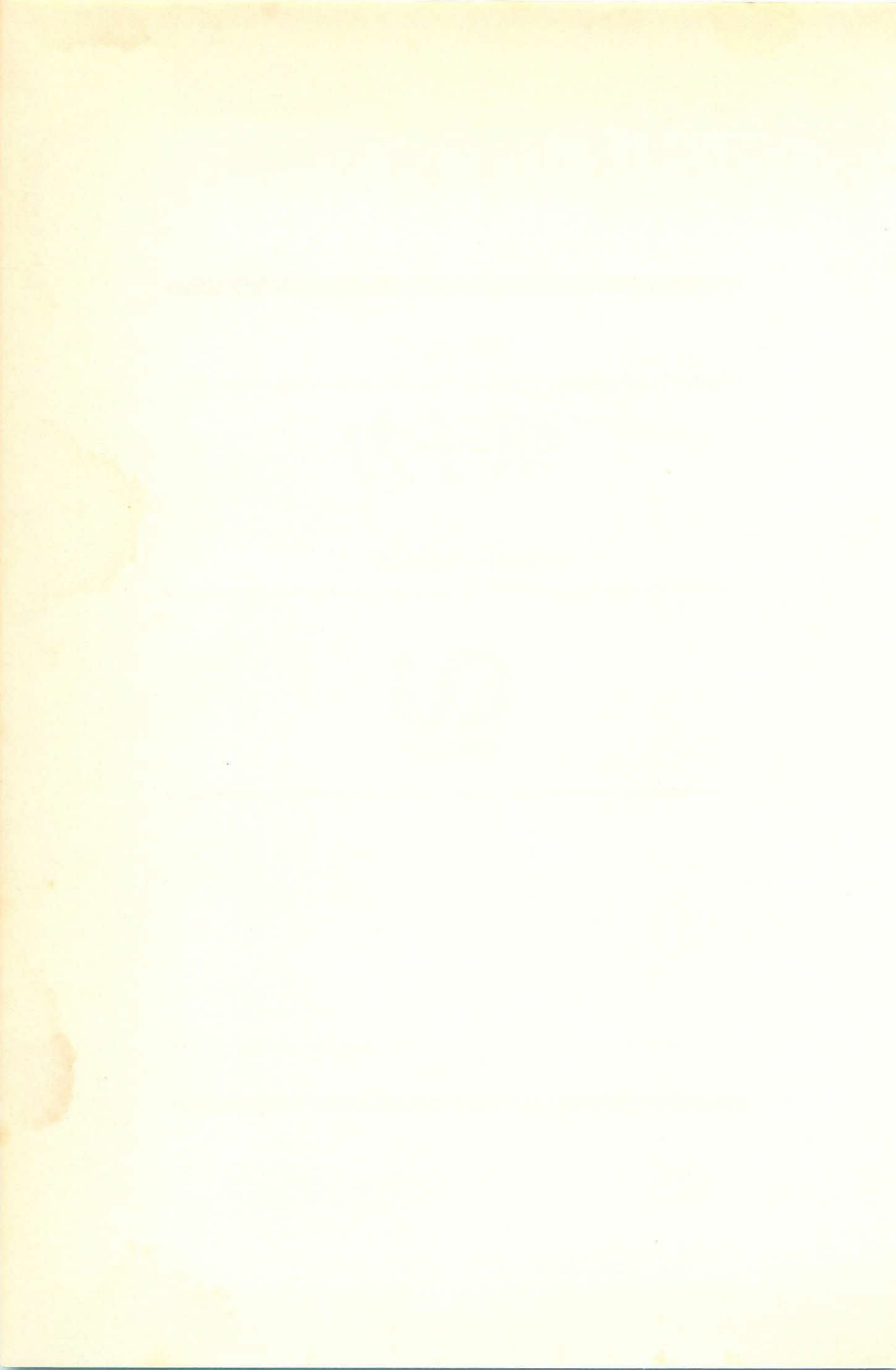
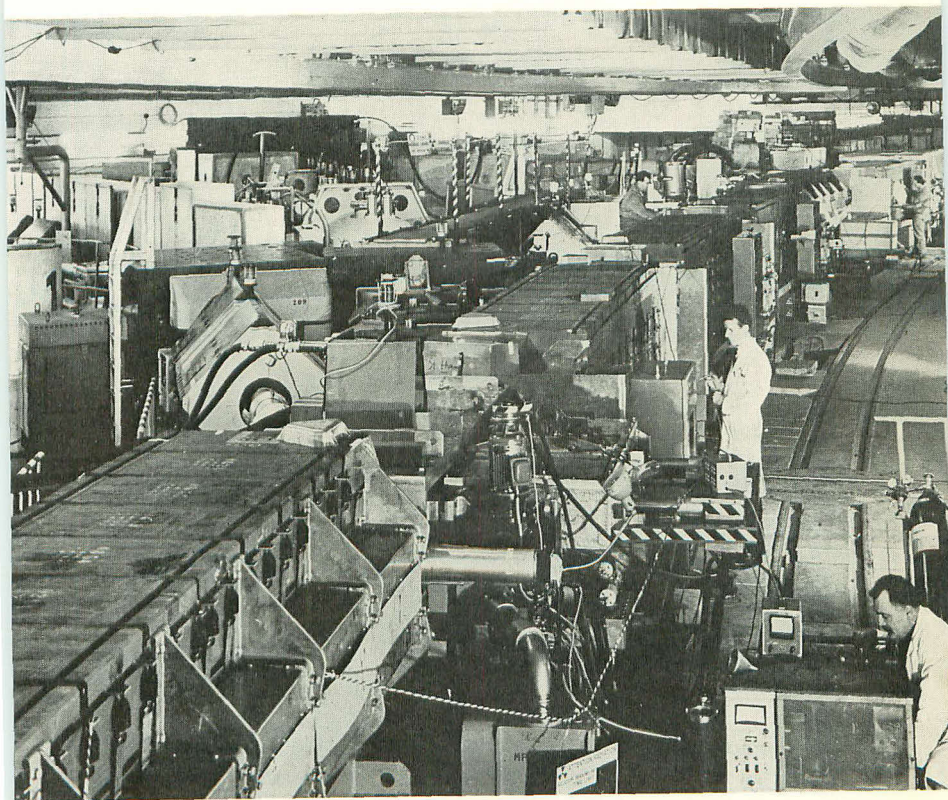
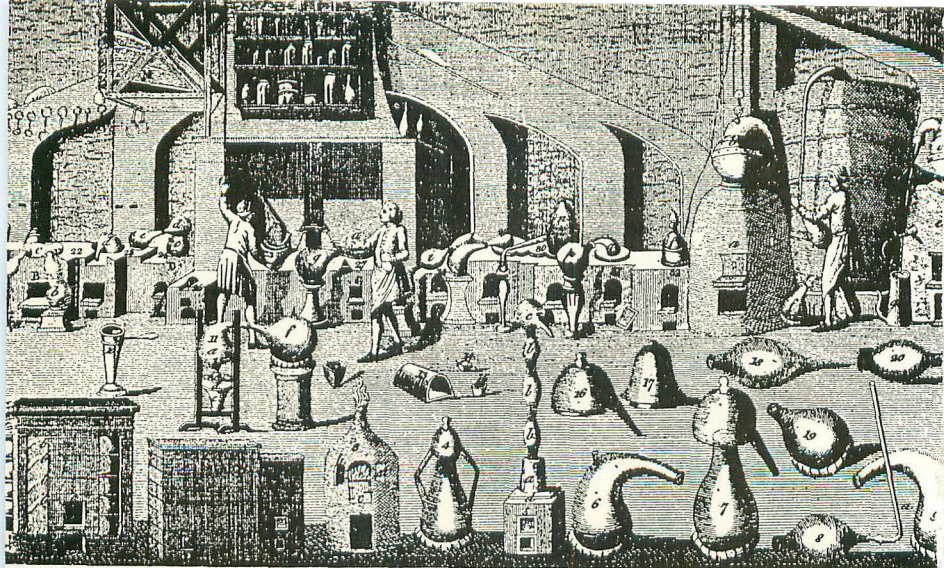
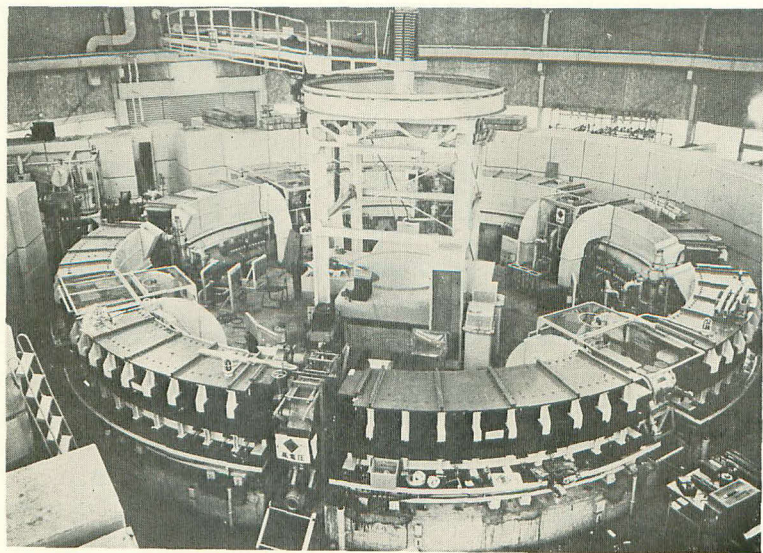
熊谷寛夫

原子力

エネルギー革命を追って

筑摩総合大学

＊

筑摩書房

原子力研究——過去から未来へ

▲最先端　欧州合同原子核研究機構（CERN）の28000MeV陽子シンクロトロンの一部。素粒子物理学の研究に使われるもので，17世紀以来急速に発達した物質構造の研究の流れの最先端である。

▲“仕事場”から　17世紀の英国のボイルの実験室。物理学と化学の区別のない頃に使われたもの。このような“仕事場”から物質構造の研究は発展し，その途中で「原子力」の応用を生んだのであった。本文38, 41頁参照。

▲日本で　東京大学原子核研究所の電子シンクロトロン。電子を1300 MeVに加速して素粒子の実験研究に使う。本文99，103頁参照。

まえがき

人類が消費するエネルギーは年を追うにつれて増加し，ある推定によれば，今後100年間の必要量の60％は原子力によらねばならぬという。ここに原子力の問題の重要性がある。原子力がなければ人類の将来は心細いものである。とはいっても，原子力をこのように多量に駆使するためには，その利用方法，それに必要な技術に大きな変化が起る。いわゆるエネルギー革命がともなうであろう。この革命の実態を一般の人が知識としてつかむことが，これから大切になると考えられるのである。

その意味で本書は一般の人に話しかけるつもりで書いた。一般の方々がエネルギー革命について理解するためには，単に原子力だけでなく，それをとりまく物理学を理解する必要があると私は長く考えていた。そのために本書では，原子力の周辺の問題のために相当の頁数を費して，自然科学の中における「原子力」の位置づけに心をつかったつもりである。

原子力の問題をとりまく自然科学の中には，まず原子と原子核の問題がある。これらについて理解を深めようとすれば，物理学でいう力，仕事やエネルギーの概念を理解する必要がある。というのは，原子や原子核の構造を理解するためには力，仕事，エネルギーの概念が大切であるからである。原子力は原子核反応におけるエネルギーを利用しているわけである。

このために第3章で，力などについて，平易に，しかも本質を失わないような説明を行なった。そして，力やエネルギーの概念が原子や原子核に適用されるとどのようになるかを述べている。さらにこれに加えて，比較によって理解を深めるために，太陽系

における太陽と地球の力学的関係についても説明を試みている。このようなわけで第3章は，ふつうの「原子力」の書物にはあまり見られない内容になっている。

このように物理学の根本概念を説明する第3章の前に，第1章と第2章がある。第1章は，私個人の経験を折り込んで，原子力の歴史を物語のように述べたものである。第2章は物質構造の研究の歴史をギリシア時代から現代まで述べて，この間の原子の存在，構造，さらには原子核の構造についての考え方の発展を説明し，素粒子の存在にふれている。このときに物質の間に働く力，特に素粒子の間に働く力の種類について述べている。原子や原子核の構造について理解するために，それを構成している素粒子の間に働いている力について知ることがぜひとも必要だからである。

このあとで第3章で力，仕事，エネルギーについて説明しているわけである。つまり話が前後している。話が前後するのは本書のあり方からくるものである。話が前後するのを避けるには二つの方法がある。その一つは，ギリシア時代から話をおこして現代の原子力に至るまでの物質構造の研究の歴史を時代を追って説明することである。もう一つは，歴史にかかわりなく，まず陽子，中性子，電子のような素粒子の存在と，その間に働く力から説き起して原子核，原子の構造の説明を行ない，原子力を理解する方法である。はじめのものは歴史的といえるし，後のやり方は原理的といってよいであろう。本書のやり方はこのどちらでもない，混合方式である。

完全に原理的な立場をとると，物理学者ならばよいが，一般の人にとっては読みにくいものになる。これに加えて歴史的記述がないと，将来の見通しについては何もわからないことになる。このために本書のような目的の場合には，完全に原理的な立場をとるのはよくないことであると私は考える。むしろ歴史的記述に近い方がよい。しかし，歴史のある時点で，たとえば原子の構造に

ついてある概念の発達があったときに，それが過去から現在に及んで，どんな意味を持っているかを述べることは，自然科学のもっている合理的な面を一般の人に理解していただくのに好都合であると思う。つまりその点では原理的な記述を行なう。さらに歴史的記述にもどる。このようにすると混合方式になってしまう。

混合方式のあらわれの一つとして，第3章で力と運動についてニュートンの運動方程式を述べているが，その前の第2章で原子構造を説明している。もちろんニュートンの運動方程式は17世紀に確立されたもので，20世紀の初頭に原子構造が確立されるよりも200年以上も前のことである。しかし本書ではまず原子構造を述べてから，ニュートンの運動方程式に入っている。このようにして，素粒子や原子と，その中における力についてある概念を得てから力や運動について考えるほうが，生き生きとした説明になると考えるためである。

このような書き方では同じような概念や言葉が各章に繰りかえして出てくる。たとえば同位元素という言葉がほとんど各章に出てくる。これは繰り返し方式でもあると考えながら書いた。また小説の手法でいう「フラッシュ・バック」であるともいえる。このような方式を採用し，しかもくだらない重複をさけるためには工夫が必要であった。この点不満足な点が未だ多く残っていることを心配している。

本書でたびたび出てくるのは実証主義の強調である。自然科学は合理的な推理と実証によって成り立ち，このどちらが欠けても成立しないものである。しかし合理的な推理は2000年も前からあったが，自然科学という立派な花が開いたのは，14世紀の文芸復興以来根ざしていた実証精神が17世紀になって，合理的精神と手をつないだときにはじまったという観点を，いろいろな角度から繰りかえして述べてある。この点は「原子力」ばかりでなく自然科学の将来を見通すためにもっとも大切なことであると考え

ている。

このようにして第3章までに，物理学あるいは自然科学としての用意を整えたあと，まず第4章で原子構造の応用として，化学反応について述べている。このねらいは，われわれが日常利用するエネルギーは化学反応のそれであるから，原子力というエネルギーをふつうの化学反応のエネルギーと比較して理解すると好都合であるからである。つまり，エネルギー革命を原理的な面からみるためである。

次に第5章で，原子核反応と，その測定法について述べている。第6章の核分裂反応を理解する準備である。

これらの準備の上で第6章では本書の頂点である核分裂反応の応用に入り，原子力発電，原子力船，さらに原子爆弾について述べる。その際に，できるだけ原理的なことがらを述べ，あわせて応用の現状にもなるべくていねいにふれた。

第7章の核融合反応では，その将来への希望と，現在の技術的段階を述べ，あわせて天体における核融合反応についても説明した。これに加えて，人類がもっているエネルギー問題とその将来の見通しについても述べてある。

原子力の利用は，放射線をともなうので，その人類に対するプラス面とマイナス面を第8章で説明した。理解を正確にするために放射線の測定法や単位についても述べてある。

おわりに，第8章の一部についてご教示を得た理化学研究所主任研究員・浜田達二氏と，校正刷に目を通していただいた同じく理化学研究所サイクロトロン研究室の和田雄氏にお礼を申し述べたい。

1970年6月

目　次

原 子 力

エネルギー革命を追って

第1章　原子力研究の歩み

§1　思い出すこと

私が14, 5歳の頃，松本市に近い故郷の田舎道で，自然科学に興味を持っている先輩が，マッチ1本の中にあるエネルギーを完全に利用するならば汽船で太平洋を何回も往復できるそうだと話してくれたことを私はいまでも覚えている。その話を聞いた場所まで記憶に残っている。1926年頃のことで大正と昭和のうつりかわりの頃である。その頃アインシュタイン（A. Einstein, 1879—1955）が日本に来たことがあり，相対性原理の話が世にさわがれていた。相対性原理を理解している日本人は数人にすぎないと，これも同じ頃に聞いたものである。

マッチ1本のエネルギーを使って汽船が太平洋をわたることができるというのは，おそらくアインシュタインの講演の中にあったのであろう。相対性原理の結果として質量 M kg は，エネルギーになれば，$M\times c^2$ ジュールになることをアインシュタインが唱えていた。この c は光の速さで，3×10^8 m/sec という値である。 M kg に相当するエネルギーを E ジュールとすれば，式で書くと，

$$E = Mc^2 \text{（ジュール）} \qquad \langle 1\text{-}1\text{式} \rangle$$

となる。マッチ1本はおよそ1万分の1 kg（0.1 g）であるから，この式で計算すると，そのエネルギーはおよそ 1×10^{13} ジュールとなって，1万馬力の客船が15日かかって太平洋を渡るとすれば，ほぼそのためのエネルギーになる。

このような質量とエネルギーの関係は，相対性原理の理論の一

つの結論であって，これが事実としてあらわれることをだれが期待したであろうか。その後の科学と技術の進歩には驚くべきものがあり，これが現在では事実になっている。いわゆる原子力船，原子力潜水艦，原子力航空母艦がこれである。これらの船ではウラニウム（ウラン）235という特別な物質を燃料として，その質量の一部分をエネルギーに変えて走っている。ただ，このときには，この燃料の質量の約1000分の1を使うことができるだけで，残りは使えない。マッチ1本の全部をエネルギーとして使えば，1万馬力で太平洋を渡れるが，その1000分の1しか使えないので，マッチ1000本に相当するもの，つまり，およそ0.1 kgのウラニウム235を用いると太平洋を渡れることになる。このことは科学的にも重大なことであるが，技術的にいっても，何百トンという石炭や重油を使うことにくらべれば，大変な進歩である。これを可能にしたのは，アインシュタイン以後の原子と原子核に関する実験物理学の進歩によるものということができる。

私が少年の頃には，相対性原理を理解できる日本人は数人にすぎないと言われていた。ところが今日では，実験装置によって，相対性原理の結果をいやでも見せつけられるようになっている。実験物理学に必要な装置の一つに電子シンクロトロンというのがある。これは原子核物理学の研究に使うために，磁石，電波，真空の働きを利用して電子の速度をしだいに大きくしていく装置である。電子の速さは光の速さに近づくが，それを越えられない。しかしそのエネルギーはどんどん大きくなっていき，それにつれてその質量が大きくなり，$E=mc^2$ に相当していることが確められるのである（m は電子の質量）。理解するとかしないとかいうことは，どこかにけしとんでしまう。電子シンクロトロンの運転を見，原子力船の運行を見ていると，むかし相対性原理を理解できる人が少ないと聞いたことは，いったいどういうことなのかと考えこむことがある。これは，理論を理解することと実験事実を認

めることとに，われわれの認識の中でどのような立場を与えるべきかということに関係のあることであろう。

§2　原子核物理学の芽生え

元素の人工変換　原子核の反応におけるエネルギーの利用を「原子力の利用」とよぶことは，のちに述べるように，言葉として問題があるが，ここではとりあえず「原子力」としておこう。原子力の利用が可能になったのは原子核物理学が次々と発展したたまものである。私が少年の頃の原子核物理学は，いったいどのような状態だったのであろうか。

その当時は，原子核をまったく完全に人工的に変換することに成功していなかったし，中性子も発見されていなかったが，ある意味の原子核の人工変換には成功していた。というのは，1919年に英国のラザフォード(E. Rutherford, 1871—1937)が，窒素にα-粒子を打ちつけることによって酸素と水素を作り出すことに成功しているからである。α-粒子はヘリウムの原子核であるから，ラザフォードは窒素とヘリウムから酸素と水素を作ったことになり，人工的に元素を変換したということができる。だが，作り出した酸素や水素の分量は，それを気体として見ることができる分量ではない。水素の原子核，つまり陽子がこの反応のあとで勢いよくとび出してくるのを，シンチレーションという特殊な技術を使って一つ一つかぞえて，水素ができたに相違ないというわけであった。原子を一つ一つかぞえるという分量がどんなにわずかの分量であるかについては後の章で説明しよう。

このような元素の人工変換は，原子核の衝突の結果，原子核が別のものに変化することを利用して行なわれたものである。原子核のまわりの電子の数は，原子核が変化するのにつれて，自然に変化している。この意味で，ラザフォードの成功を，原子核の人工変換といったり，元素の人工変換といったりする。原子核を変

化させることが原子を変化させることであり，結局元素を変化させることになるから，原子核を変換するといっても，元素を変換するといっても，同じことになるからである。1919年のラザフォードの成功を完全な人工的な元素の変換といわないのは，打ちつけたα-粒子が人工のものでなくて，ラジウム系統の放射性元素からとび出したものを使ったからで，後で述べるように1932年になって人工的に作った粒子による元素の変換に成功している。

原子の構造と原子核　原子では中央に原子核があり，そのまわりに電子があるということがはっきりしたのは，ラザフォードの原子核の人工変換の成功の8年前の1911年である。これもラザフォードによって行なわれた。彼は，金の薄い箔にα-粒子を打ちつけて，そのあとの散らばり方をしらべた。その結果，金の原子の中心に重くて正の電荷を持つ「芯」があり，α-粒子もやはりヘリウム原子の中心にある重くて正の電荷をもつ「芯」であるならば，実験結果を説明できることがわかった。金の原子もヘリウムの原子もその「芯」のまわりに，負の電荷をもつ電子がうまくとり巻いて，全体として中性になっているというのである。この「芯」をラザフォードらは「原子核」と名づけた。このように，中央に原子核がありそのまわりに電子があるという原子の構造は，なにも金やヘリウムに限るのではなく，水素からウラニウムまでのすべての元素の原子がこうなっているというのである。

それより前に日本の長岡半太郎博士が，原子はいま述べたような構造になっているのではないかという論文を発表していたということが有名である。英国のトムソン（J. J. Thomson, 1856—1940）は，中央に負の電荷があり，まわりに正の電荷があるといっていたという。

原子の構造についてこんなことが考えられたのは，そもそも原子というものは，物質構成の最後の単位で，これ以上はこわれることはないと信じられていたものが，1897年頃になって，あや

しくなってきたからである。それは真空技術と電気技術の発展によって起った。ガイスラー管といって，ガラス管に二つの電極を封入し，なかの空気を真空ポンプで除去して，誘導コイルの電圧をかけると放電が起る。これについて英国のトムソンなど大ぜいの人がいろいろと調べていると，その中に，水素の原子よりひどく軽くて，負の電荷をもつものがあることがわかった。これが電子である。つまり，原子の「かけら」があることがわかったのである。そのうちに，重さは水素の原子と同じで，正の電荷を持つものがあることがわかり，これが陽子である。陽子と電子があることがわかると，さて，いったいこれらのものは原子の中でどのようにならんでいるのかということが問題になる。日本の長岡先生や英国のトムソンがこれについて試案を出していたのである。これらの試案のうち，どちらが本当か決着をつけたのが，1911年のラザフォードの実験であったわけである。

§3　中性子の発見

原子力の利用が可能になったのは，原子核物理学の進歩によるものであるが，その中でもとりわけ中性子が大切な役目を果した。私どもが石炭や重油を燃料としてそのエネルギーを利用するときに，「熱」が果しているのと同じ役目を，原子力では中性子が果している。

1926年頃には，中性子というものがあることに人類は気がついていなかった。陽子と電子があることがわかっていたので，あらゆる原子は陽子と電子があつまって作られていると考えられていた。原子の中心にある原子核も，陽子と電子があつまって作られていると考え，あとで述べるように，いろいろの矛盾があって困っていた。ところが中性子があることがわかってからは，原子核が，陽子と中性子があつまってできていると考えると，大部分の矛盾がなくなることがわかり，物理学者は大喜びをした。中性

子の発見は，原子力の解放に貢献しただけではないのである。

奇妙な放射線　それでは，この中性子はどのようにして発見されたのであろうか。1919年にラザフォードが α-粒子を窒素にあてて原子核の人工変換に成功して以来，α-粒子を他の元素に衝突させて原子核人工変換の研究をする人が世界にたくさんあらわれた。あらゆる元素が対象にえらばれたが，ベリリウムに α-粒子をあてると，奇妙な放射線が出てくることがわかった。このことにはじめて気がついたのはドイツのボーテ（W. Bothe, 1891—1957）で，1930年のことである。

この放射線は，物質を透過する力が非常に大きかった。物質をよく透過するものは，当時は γ-線だけしか知られていなかったので，これも γ-線であろうと考えられた。γ-線というのは，電波やX-線と同じく電磁波であって，波長が非常に短いものである。

γ-線は物質にあたると，その中の原子から電子を打ち出すが，その電子がイオンを作ったり写真乾板に感じたりする。このために γ-線の存在がわかる。γ-線自身のままでは，われわれの感覚に訴えることはできないわけである。γ-線があたったときに電子を打ち出す働きは，水素より，鉛のような化学の周期表の終りにある元素，つまり重い元素の方が大きい。

ところが，α-粒子がベリリウムにあたったときに出てくる放射線には妙な性質があることをフランスのジョリオ（F. Joliot, 1900—58）が発見した。この放射線は鉛よりも水やパラフィンなど，水素を含むものにあたると，イオン化作用をもつ粒子をより多く打ち出すというのである。これは γ-線の性質としては不思議なことであるが，それでもジョリオは，γ-線の波長が非常に短いためにこうなるのだろうといっていた。

ところが，これを聞いた，英国の，ラザフォード門下のチャドウィック（J. Chadwick, 1891—）は，この不思議な放射線は，γ-線ではなくて，まったく新しい粒子，つまり，質量は陽子と同じく

らいで，電荷をもたない粒子であろうと考えて，それを証明する実験を行なった。ウィルソン霧箱を用いてみごとにこれを証明したわけで，これを中性子 (Neutron) と名づけた。ここに中性子の存在がはっきりしたことになる。これは1932年のことである。

ボーテに出発した実験は，ジョリオで飛躍し，チャドウィックで実を結んだ。ラザフォードは，かねてから研究室で，中性子のような粒子があると原子核の構造を考えるのに都合がよいと話していたとのことである。これがチャドウィックの成功のヒントであろう。この成功によってチャドウィックは1935年にノーベル賞をうけた。ボーテもおくれたが1954年にノーベル賞をもらっている。

§4　原子核の構造

原子の構造については，1911年のラザフォードの研究によって，原子核という「芯」のまわりに電子があり，その質量の大部分は原子核という芯に集中し，原子核は正の電荷を持ち，周囲の電子の負の電荷と消し合って中性になっていることがわかったことを前に述べた。周囲の電子を「芯」のまわりの「衣」とすれば，ラザフォードの実験によって，物理学者がこの「衣」について物を考える基盤ができたわけである。このために原子そのものの性質や，原子が他の原子と化合するときのありさまについての研究が，非常ないきおいで発展したのであった。

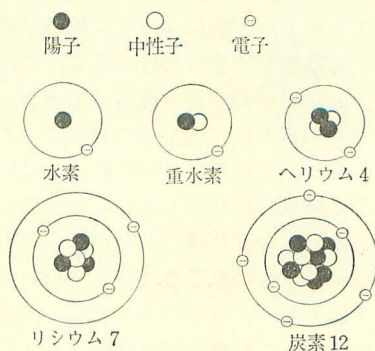
しかし，原子核についてはそうはいかなかった。というのは中性子が発見されないうちは，原子核の中の構成粒子を陽子と電子であるとしなければならないことに困難があったのである。たとえばヘリウムの原子核では，その質量は水素の原子核である陽子の4倍である。電子はとても軽いから，この質量を説明するためにはヘリウムの原子核には陽子が4個あるとしなければならない。そうすると電荷が陽子の4倍になってしまって，実際は2倍であ

ることと矛盾してしまう。それで仕方ないので，ヘリウムの原子核の中に電子を２個入れて，電荷を打ち消して陽子の２倍にしていた。なんとも複雑で，苦肉の策のかたむきがある。複雑なばかりでなく，原子核がこのように陽子と電子だけからできているとすると，根本的に困難な矛盾におち入る例が多くあった。

ところが中性子が発見されると，ヘリウムの原子核では，陽子２個と中性子２個があつまってできていると考えればすっきりしてしまう。他の原子核も同様である。これでやっと，原子核の性質や構造について，物理学者が物を考える基盤がかたまったのであって，このあと，原子核についての物理学の研究が，いきおいよく出発することになったのである。

化学でいう元素の原子番号とは，原子核のもつ電荷が陽子のそれの何倍かということである。つまり原子核の中にある陽子の数が原子番号になっていることになる。原子の「衣」の方の電子の数は，原子核の中の陽子の数と同じである。

元素には同位元素といって，化学的性質は同じでも，その原子量が異なるものがあることがわかっていた。たとえば水素に対して重水素があり，リシウム(リチウム)にも原子量が水素のおよそ６倍のものと７倍のものがある。これらについては，原子核の中の陽子の数は同じで，中性子の数が違うのであると考えると簡単に説明できる。

さて，このように，原子が，陽子，中性子，電子から作られているありさまを模式的に書くと，〔1-1図〕のようになる。

1-1図　原子の構造

原子の構造がこんな簡単な模式図であらわすことができることから，「自然とは意外に簡単なものである」と考えてもよいと思う。といっても，これですべてがわかったというのではなくて，原子の外側の「衣」の中にも，「芯」である原子核の中にも，物理学の神秘が無数にかくされていて，未だ掘りつくされてはいない。無限の研究が必要なのである。

ここで原子をあらわす符号について述べておこう。たとえば酸素ならば，その元素記号 O をまず書く。そして，その原子番号，つまり原子核の中の陽子の数 Z を左の下に書く。この場合8であるから，$_{8}\mathrm{O}$ とする。さらに，原子核の中に陽子と中性子とが全体として何個あるかを示す数字を左上に書く。これを質量数といって，ふつう A であらわす。この数字については酸素には15, 16, 17 などがあり，ふつうの酸素は16であるから，それをあらわすときには $^{16}_{8}\mathrm{O}$ と書く。酸素の原子には同位元素として $^{16}_{8}\mathrm{O}$ の外に $^{15}_{8}\mathrm{O}$, $^{17}_{8}\mathrm{O}$ があるわけで，これらは原子核の中の中性子の数が違うことになる。これによると水素の同位元素は $^{1}_{1}\mathrm{H}$, $^{2}_{1}\mathrm{H}$（または $^{2}_{1}\mathrm{D}$）であらわすことができ，ヘリウムでは $^{3}_{2}\mathrm{He}$, $^{4}_{2}\mathrm{He}$ などとなり，リシウムでは $^{6}_{3}\mathrm{Li}$, $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ などになる。

§5　質量とエネルギーの関係の実験的証明

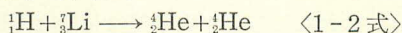
コッククロフトらの実験　アインシュタインが相対性原理の結果のひとつとして提示した，質量とエネルギーとの間の関係〈1-1式〉は理論の結果であったが，これを実験によって数量的に証明したのが1932年，英国のコッククロフトとワルトン（J. D. Cockcroft, 1897—1967, E. T. S. Walton, 1903—）によって行なわれた，原子核の完全な人工変換の実験である。

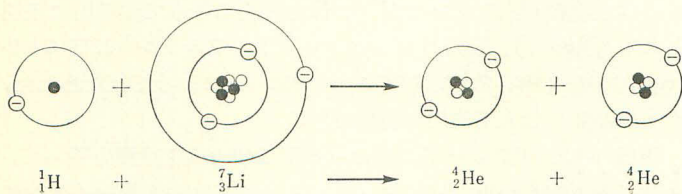
1919年にラザフォードが行なった原子核の人工変換と違って，完全に人工的というのは，コッククロフトらは，水素をイオンにし，真空の中で電界の働きによって加速して，そのエネルギーを

大きくした粒子――人工的に作った高速陽子――を用いて原子核の人工変換に成功したからである。この成功は，そのあとサイクロトロンなどの加速器を用いて原子核物理学のくわしい研究が行なわれる出発点となったもので，さらに大型加速器によって素粒子物理学の実験研究が行なわれることにつながっている。

さて，コッククロフトらはエネルギーを大きくした陽子をリシウムに打ちつけたところ，α-粒子が作られることをたしかめた。α-粒子はヘリウムの原子核であり，陽子は水素の原子核である。前にも述べたように原子核が作られたことと，原子，つまり元素が作られたこととは同じであるから，この実験は水素とリシウムからヘリウムを作ったことになる。ただし，この実験でも，出てくる α-粒子をシンチレーションという特別な技術によって一つ一つ数えたものであって，ヘリウムを気体の泡のようにつかまえたというものではない。

この反応を式で書くと，

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{7}_{3}\mathrm{Li} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad \langle 1\text{-}2\,式\rangle $$

となる。この反応を〔1-1図〕と同じように模式的に書いてみると〔1-2図〕のようになる。

この図を見ると，原子と原子の衝突によって他の原子に変化しているように見えるが，実は水素はまわりの電子をもぎとられて，原子核だけ，つまり陽子となって，リシウムの原子核にぶつかりヘリウムの原子核になったものである。そのおのおのに電子が附

1-2図　水素とリシウムの核反応

着して原子になったものとして，式に書いたものが〈1-2式〉や〔1-2図〕である。

質量差としてあらわれるエネルギー　さてこの反応についての研究が質量とエネルギーの関係を数量的に証明することになったのであるが，まず質量の面から考えてみよう。この反応の前とあとでは，質量が約1000分の1くらい減少しているのである。質量の変化については，$^{1}_{1}$H, $^{7}_{3}$Li, $^{4}_{2}$He の質量がわかればよいわけである。これらの質量が1000分の1よりもよい精度でわかっていた。それは，これらを天秤で測って知ったものではなく，これらのイオンを真空の中で走らせ，電界や磁界によって曲げてみて，その曲りぐあいから質量を求める方法によったのである。これはいわゆる質量分析計（マススペクトログラフ。第3章§9参照）の方法で，これもラザフォードのいた研究室でアストン（F. W. Aston, 1877—1945）が1925年頃から J. J. トムソンの指導によって測定装置の改良を行なっていたものである。この方法でわかっていた質量によると，〈1-2式〉の左辺の $^{1}_{1}$H と $^{7}_{3}$Li の質量を加えたものよりも，右辺の二つの $^{4}_{2}$He の質量を加えたものは明らかに軽くなっていて，その差 ΔM を正確に知ることができる。

一方，変換の前の陽子の速さは，人工的に大きくしたとはいえ，それ程でないのに，出てくる二つの $^{4}_{2}$He は大きい速さをもっていた。そのエネルギー——この場合は運動のエネルギー——の増加分を E とするとちょうど

$$E = \Delta M \times c^2$$

の関係が成立していた。これによってアインシュタインが唱えた質量とエネルギーの関係が実験と一致したわけである。現在の科学が，実験によって確めながら進歩してきた実証科学であることを考えると，これで質量とエネルギーの関係を示す〈1-1式〉が科学的事実となったといえる。

これらの功績について，コッククロフトらは1951年のノーベ

ル賞をうけ，アストンは同位元素の質量の精密測定に先立って，同位元素の存在の確認の功績によって，1922年にノーベル賞をうけている。

ここで気がつくことは，原子の構造から出発して，元素の人工変換，中性子の発見，完全に人工的な元素の変換，同位元素の質量測定などが，みな英国の J. J. トムソンとラザフォード一派によってなしとげられたということである。これは個人の影響と伝統の力が大きいことを示している。今日のような情報時代となってもこれは忘れてはならないことである。

§6　核反応のエネルギー利用への模索

1926年の頃には私は，自然科学に特に興味を持ってはいなかった。しかし，あの先輩の影響というわけではないが，次第に自然科学に傾き，旧制高校では理科をやり，大学では物理学をえらんだ。1934年に大学を卒業してからは，大阪大学で原子核物理学の研究生活に入った。中性子が発見され，また，コッククロフトの完全な人工的元素変換の実験が成功したのが1932年であるから，私の研究生活入りはその2年後のことである。

大阪大学では，コッククロフトが作ったと同じような装置を作って，原子核の人工変換の実験をやり，さらに同じ装置で中性子を作って，中性子の性質や，中性子がいろいろな原子核に衝突したときの現象について研究を行なった。

当時は，原子核物理学の研究は珍しかったので，故郷の友人のすすめで故郷の人たちに原子核物理学をとりまく新しい物理学の講演をしたことがある。1939年のことである。その講演の中で，コッククロフトが成功した水素とリシウムの原子核反応では質量が消滅してエネルギーが出ていることも述べた。

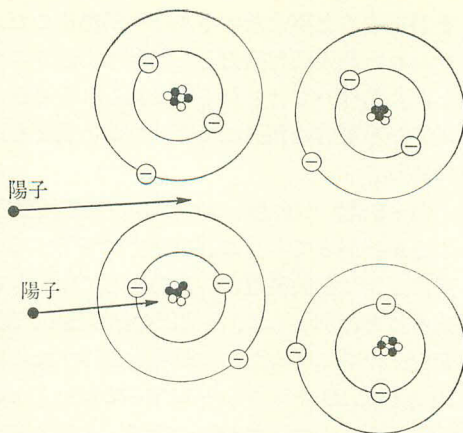
講演のあと雑談しているときに，かつてマッチ1本の話をしてくれたあの先輩が，水素とリシウムからヘリウムができる反応

を利用すると莫大なエネルギーが出るのだから，そのエネルギーをわれわれ人間が動力として利用できるのではないかと私に質問した。私はハッとしたものである。その前から，原子核物理学の研究から動力の開発はできないかと私どもに言う人があったからである。

〈1-2式〉の水素，リシウムの原子核反応でエネルギーが出ることがわかっても，これを動力に利用することはできない。この反応を起す実験装置は，当時としては大きい費用をかけたものであることは別として，高電圧を作り出し，真空ポンプを動かし，水素をイオンにするための装置を動かすために電力がいる。それは10ないし20キロワットになっていた。ところが，苦労して作った陽子をリシウムに打ちつけて，水素，リシウムの原子核反応がいくつ起ったかと計算し，そのために出てくるエネルギーをワットであらわせば，100万分の1ワットにすぎない。なんと，実験室で使ったエネルギーの100億分の1にすぎない！　そもそも原子核反応のエネルギーを動力として利用するためには，はじめにつぎ込んだエネルギーよりも大きいエネルギーが出てこなければならない。つまりエネルギーの儲けがなければならないのに，この水素，リシウムの原子核反応はエネルギーの大損になっている。

どうしてこんなことになるのかというと，その第一は，高速陽子を作ることはあまり容易とはいえないために，陽子がリシウムにとびかかっていくときのエネルギーを，陽子の数とその運動のエネルギーから計算すると，たかだか5ワットになってしまっている。ここでおよそ3000分の1になる。第二の難関は，リシウムという物質にとび込んだ陽子のうちのいくつが水素，リシウムの原子核反応を起すかということである。

陽子は〔1-3図〕のようにリシウム原子の群の中にとびこんでいく。リシウムの原子核に衝突しないで，原子の「衣」の電子と衝突して減速し，しまいに止ってしまう陽子が大部分である。も

ともと原子の中で原子核は，重いけれども大変に小さい。〔1－1図〕や〔1－2図〕では，理解しやすいように大きく書いてある。〔1－3図〕では原子核を小さく書いたが，これでも大きすぎるので，ほんとうは原子の大きさが野球場くらいだと，原子核は蚤くらいの大きさになる。

1-3図　陽子がリシウムの原子核に衝突するのはむずかしい

つまり，陽子はなかなか原子核に衝突できないことになる。実験によると，リシウムの原子群の中にとびこんだ陽子のうち１億分の１だけが原子核反応を起すことになる。ひとたび原子核反応が起れば大きいエネルギーが出ることを計算に入れても，出てくるエネルギーは100万分の１ワットになってしまう。

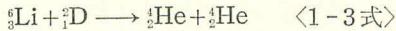
原子核物理学の実験用の装置は，エネルギーの損得から見れば，こんなにみじめなものである。サイクロトロンなどもみんなそうである。自然の真理をさぐる研究装置であるから，エネルギーの損得を問題にしなくてよいわけである。

故郷での講演のあとで質問されたときには，これだけのことをすじ道立てて答えることはできなかった。水素とリシウムの原子核反応のエネルギーを動力として利用することは，「とにかくダメです」と答えたのを覚えている。

〈1－2式〉のような反応を，イオン加速器を使わないで，なんとかして多量に起して発生するエネルギーを利用しようとする考

えがある。このためには，ひとつの反応が起ると，それが次のものを呼び起すような形式，つまり連鎖反応によらねばならない。いわゆる「ねずみ算式」に反応がましていくようにするわけである。このように〈1-2式〉の反応の連鎖反応を起すための研究を核融合の研究という。

〈1-2式〉の反応の中で，$^{7}_{3}Li$ の代りに $^{6}_{3}Li$ を，水素の代りに重水素を使っても，やはり二つのヘリウム原子ができる反応がある。

$$^{6}_{3}Li+^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He+^{4}_{2}He \qquad \langle 1-3式\rangle$$

この反応では〈1-2式〉の反応よりも，出てくるエネルギーが大きい。反応の強弱を人間が制御できるような核融合反応は未だどこでも成功していない。しかし制御の必要のない核融合反応，つまり水素爆弾の主役は〈1-3式〉の反応であろうとされている。リシウム6($^{6}_{3}Li$)と重水素の特殊な化合物の近くで，ふつうの原子爆弾を爆発させると，〈1-3式〉の反応がねずみ算のように起るのが水素爆弾らしいのである。原子爆弾の爆発というような特殊な条件でないと起らない現象を利用しているのであり，また物騒な利用でもあって残念ではあるが，重水素とリシウムの原子核反応はエネルギー源として利用されているといわざるを得ない。

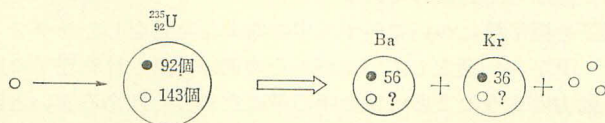
§7　核分裂の発見

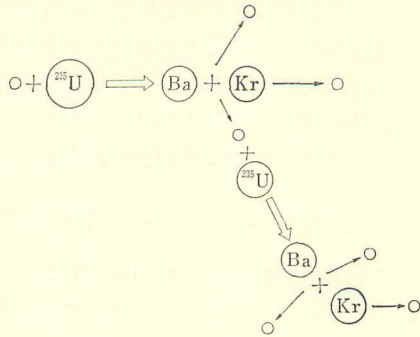
水素とリシウムの原子核反応を動力に利用できないかと質問され，「ダメです」と返事していた1939年に，核分裂の発見が行なわれていた。この発見によって，中性子によるウラニウムの分裂反応が，原子核反応のエネルギーを動力として利用する可能性を思わぬ面から開いたのである。

原子や原子核についてかずかずの偉大な発見をしたラザフォードは，1937年に逝去しているが，その前に，原子核物理学の研究は，動力のようなことで世の中の役に立つことはあるまいと言ったということである。しかし，逝去の2年あとには，原子核反応

のエネルギーを動力に利用することを可能にする発見が行なわれている。

核分裂反応　ウラニウムの分裂反応というのは，ウラニウムの原子核が，速さの小さい中性子に衝撃されて大福餅が二つにちぎれるように分裂することで，ドイツのハーン (O. Hahn, 1879—) とストラスマン (F. Strassmann, 1902—) が1939年に発見したものである。これを核分裂反応という。ハーンらが発見した核分裂は，ウラニウムの同位元素の中で陽子と中性子の数を加えたものが235であるウラニウム235 ($^{235}_{92}U$) が起すものであることがあとからわかった。

こんなにたくさんの陽子と中性子があつまってできている原子核がおよそ同じ大きさの二つの原子核に分裂するというだけならば，すぐには，原子核エネルギーの動力利用につながらない。これが可能になったのは，分裂のときに中性子が一つ以上出てくるためである。核分裂の話を聞いたときに，イタリヤの物理学者で当時アメリカにいたフェルミ (E. Fermi, 1901—1954) は，ウラニウムの原子核やそれが分裂してできる原子核の性質からみて，中性子が一つでなくいくつか出る可能性があるといって研究を命じたということである。その結果，出てくる中性子は平均で約2.5個であることがわかった。そこで核分裂を図に書くと〔1-4図〕のようになる。ウラニウム235の中の陽子の数はウラニウムの原子番号が92であるから92個であり，中性子の数は143個になる。分裂のあとでできる原子核にはいろいろあって，大福餅のちぎれ方が一様でないことに相当する。図にはその一例を示した。また図ではこの反応で中性子が3個できる場合を示してある。

1-4図　核分裂の一例

連鎖反応の可能性　このように一つの中性子で起した反応で，中性子が2.5個出てくるということは，ねずみ算式に，つまり連鎖反応によって核分裂を進行させる可能性があることになる。〔1-5図〕のように一つのウラニウム235の核分裂で出てきた中性子が他のウラニウム235を分裂させることができ，これがいつまでも続けばよいのである。電波，真空，イオン化装置などを使う，大きいコッククロフト式の実験装置もいらないし，サイクロトロンもいらないのである。サイクロトロンなどでは，原子核反応を起してもエネルギーの大損をするのに，核分裂では大儲けをする可能性があるわけである。

1-5図　核分裂による連鎖反応

中性子による核分裂によってこんなことが可能になったのは，中性子一つによる反応で中性子が一つ以上出てくることがひとつの理由であるが，もうひとつの理由は，中性子が原子核反応を起しやすいことも理由になっている。というのは〔1-2図〕の水素とリシウムの原子核反応では，水素の原子核つまり陽子と，リシウムの原子核の両方に正の電荷があって，これは互いに反撥力を及ぼし合っているから，陽子がのろのろと近づいたのでは，リシウムの原子核に近づくことができない。近づくためには，相当の速さを持っていなければならない。つまりある程度のエネルギーを持っていなければならないのである。そのために高電圧を使って，真空の中で陽子の速さを大きくしているのである。

これにくらべて〔1-4図〕の中性子による核分裂では，ウラニ

ウムの原子核に衝突する中性子の方には電荷がないために，互いに電気力を及ぼすことがなく，中性子がのろのろでもウラニウムの原子核に近づくことができる。ひどくエネルギーの小さい中性子が核分裂反応を起すのはこのためである。中性子が核分裂反応を起しやすいために連鎖反応が容易になっているわけである。

§8　核反応エネルギー利用の実現

原子爆弾出現のショック　1932年に中性子が発見され，1939年には中性子によるウラニウム235の核分裂反応が見出され，その際に平均2.5個の中性子が出ることがわかると，これによって，核反応を連鎖反応によって大量に引き起し，核反応のエネルギーを動力に利用する可能性が出てきたのであった。これを知った世界の物理学者は緊張したものである。私なども，これの可能性について書かれた論文を読んで，「これはたいへんなことになる」と思った。このときの印象は強烈で，親戚の家の廊下で大きな椅子に腰かけてこの論文を読んでいたその姿勢を，いまでも忘れることができないくらいである。第二次大戦が始まった頃のことであったと思う。

このときに考えたことは，このような原子核エネルギーの動力利用が可能になるとしても，それが現在の発電や内燃機関のように利用されるようになるまでにはひどくたいへんで，多量な工業技術の発展が必要であろうということであった。実験物理学をやっていた者として，工業技術の過去，現在のことをいくぶんか知っていたのでよけいにそのように思ったのであろう。電磁誘導の原理が発見されてからそれが実用になるまでの長い歴史を思ったのである。今回の戦争の間にはとても実用になるまいとも考えた。

ところがその3年あとに，原子核エネルギーの利用が爆弾となって現われたことには，大きいショックを受けたものである。原子核エネルギーを爆弾に利用することは，私などは考えてもいな

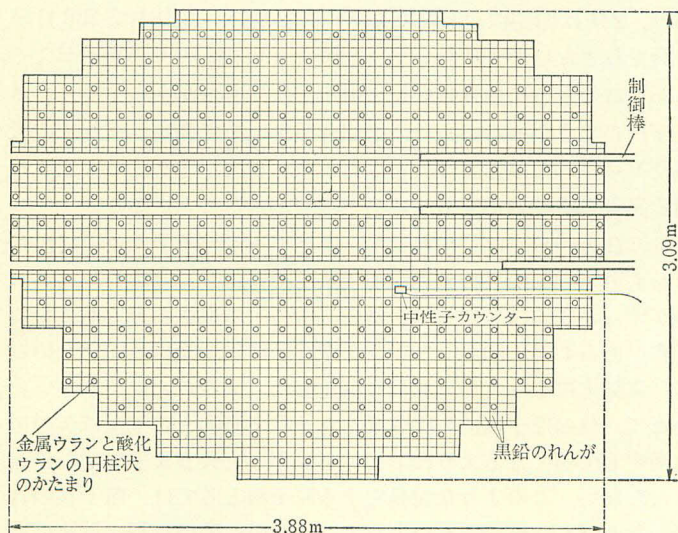
かった。発電や内燃機関のような利用を考えていた。事実このような実生活への利用を実現するためには爆弾よりも長い時間がかかったわけである。

濃縮と減速　核反応エネルギーの利用についての日本での話にはあとでもどることにして，外国での研究の模様について述べよう。この問題に熱心にとりくんだのは，アメリカにいたフェルミと，中性子の発見の研究に一役買ったフランスのジョリオであった。これらの人たちの研究について述べる前に，ふたつの技術的なことを述べる必要がある。

そのひとつは，ウラニウムの同位元素には，ウラニウム238 ($^{238}_{92}U$)，235 ($^{235}_{92}U$)，234 ($^{234}_{92}U$) の3種類があるが，中性子によって核分裂を起すのに利用できるのは235であることに関係している。3種類のうち，238が99.3%をしめ，235は0.7%だけであり，234は問題にならないくらいに少ない。この中で238は核分裂を起さないのではないが，それよりも235の方が能率がよく，しかもこのときに核分裂を起す中性子は，速さが小さくて，エネルギーの小さいものでよいので都合がよいのである。それで，天然ウラニウムで核分裂によるエネルギー利用を考えるか，235の同位元素を濃縮して実行するかの区別があることになる。

もうひとつの点は，中性子のエネルギーが核分裂によって出てきたもののままでも核分裂を起すが，それよりも速さの小さいものがずっとよく核分裂を起すので，中性子の速さを遅くしてやる必要があることに関係している。中性子は電荷を持っていないので，電気力によって加速したり減速したりすることはできない。そこで，他の原子核に衝突させ，ちょうど玉突きの玉がほかの玉と衝突して遅くなるようにしてエネルギーを失うようにしなければならない。このような役目をする原子核としては，原子核の質量がなるべく中性子に近い方がよい。このための材料を減速材とよんでいる。

フェルミがまず試みたのは，天然ウラニウムを用い，減速材には炭素を使う方法であった。一方，ジョリオは，減速材として重水を用いる方法を考えていた。ジョリオがどのようにしてこの重水を手に入れたか，またこの研究は第二次世界大戦の最中に行なわれたので，入手した重水を戦火から守るのにどんな苦労をしたかという物語が有名である。しかし，ジョリオの方はなかなか成功しなかった。

フェルミの成功　アメリカのフェルミの方は，1942年の12月には，核分裂による連鎖反応を起すことに成功して，核エネルギーの動力利用への第一歩を開いている。このために結集したアメリカ人の頭脳，実行力，それから工業力に感嘆せざるを得ない。フェルミは，〔1－6図〕のように黒鉛(炭素)をつみあげ，その中に天然ウラニウムをうまく配置して，核分裂による連鎖反応を起した。

1－6図　フェルミの原子炉(縦断面)

連鎖反応が起ったかどうかは，中性子を検出しながら観測して，おびただしい中性子の発生によってたしかめたのである。連鎖反応を起したり，止めたりするためには，黒鉛やウラニウムを積み変えたりするのでなく，カドミウムの棒を，黒鉛とウラニウムの積み重ねの中に出したり，入れたりして行なった。カドミウムは速さが小さくなった中性子を強く吸収する性質があるので，これが中に入ると，中性子が少なくなって連鎖反応が止り，引き出すと分布している中性子の数がまして連鎖反応が盛んになる。このような働きをする棒を制御棒という。

フェルミらがカドミウム棒をだんだんと引き出して連鎖反応をたしかめたのは，1942年の12月2日のことであった。場所はシカゴ大学の競技場の中で，そのあとにいまでも記念碑がある。このようにウラニウムなどをつみ上げて，核分裂による連鎖反応が起るようにしたものを原子炉とよぶ。

フェルミの原子炉の成功は，人類がこれまで使ってきた石炭，石油などのエネルギー源とはまったく異なる種類のエネルギー源を手に入れる可能性を示したものとして，非常に大きな意味がある。

フランスやアメリカでこのような動きがあるときに日本ではどうであったかというと，もちろん大きな関心をあつめていた。しかし，工業的成功をおさめることはなかなかたいへんであるという認識が一般的であった。第二次大戦中に実用化することはまずあるまいという見通しが大勢をしめていたのである。この見通しは「当時の日本の科学技術の実力では」という条件をつければまったく正しかったといわざるを得ない。

早急に実現する見通しは暗かったが，研究は各方面ではじめられた。しかし秘密に行なわれたので，一般の人には知られていなかった。もちろん学術発表もされなかった。秘密に行なわれたとしても，海軍が軍艦武蔵や大和を作ったほどの大がかりで本格的

な仕事にはほど遠い小規模のものであったようである。

アメリカは核分裂の発見のあと2,3年で連鎖反応を実現したが，他の国はみな，うまくいかないか，たいへんにおくれた。このような仕事に成功するためには，ほんとうに有能な物理学者が心から協力することが必要であるほかに，高い工業水準の基盤が必要であろう。さらにすぐれた工業技術者の心からの協力も必要である。すぐれた1人の研究者のひとり芝居というわけにはいかない。このような意味での集団的な研究能力というものは一朝一夕に養われるものでなく，つねづねの努力と心がけによって長年にわたって養成されるものである。

§9　原子爆弾

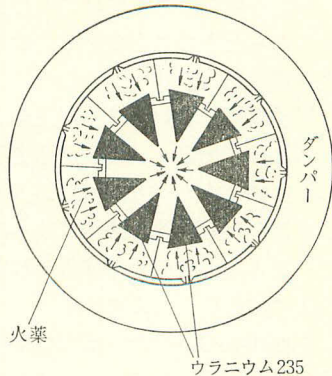
シカゴでフェルミが核分裂による連鎖反応に成功したのは第二次大戦になってからであり，たとえそうでないとしても極秘の研究であったから，その結果は日本に伝わってはこなかった。1回の核分裂で出てくる中性子の平均の数が2.5個であることも戦争が済むまでは伝わってこなかったのである。

こういう状態で，日本の原子核物理学者たちは，いつものように物理学の研究をする人，核分裂の動力利用をめざす人，原子核物理学以外の仕事で生産や軍に協力する人などさまざまであった。このようにしてやがて終戦に近づいたのである。

1945年8月6日に広島に投下された特殊爆弾が，核分裂を利用した原子爆弾であることを知ったとき，日本の原子核物理学者のうけたショックははかりしれないほど大きなものであった。

原子爆弾の構造　フェルミの原子炉では天然ウラニウムと減速材が使われていたが，同位体分離を行なってウラニウム235の純粋に近いものを作ると，減速材なしでも，はげしく連鎖反応が起って爆発することがわかっていた。原子爆弾の構造は〔1-7図〕のようであるとされている。ある距離をおいてならべてあるウラニ

ウム235を，火薬の爆発力で押しつけると，急激に連鎖反応が起って爆発するのである。

原子爆弾を作るためにはまずウラニウム235を濃くする同位体分離をどのようにして実行するかが問題であった。同位体は化学的に性質が同じであるから，化学的方法では分離できない。ウラニウムをイオンにして真空の中を走らせ，磁石の力（磁界）によって曲げ，その曲り方によって区別するのもひとつの方法である。もうひとつは，素焼きのような細かい穴を通るときに質量の違う分子の通り方が違うことを利用する方法である。

1－7図　原子爆弾

1945年8月6日に広島に投下されたものは，このうち磁界によって分離する方法によったものだという。多くの大型真空装置と電磁石がならべられ，強引に分離を行なったということである。このときにくふうされた真空装置の洩れ探し装置は，その後も改良が加えられて，今日でも真空装置の製作，保守にたくさん使われている。

8月9日に長崎に投下された爆弾は，ウラニウムではなくプルトニウム239（^{239}Pu）であったということである。プルトニウムはフェルミが作ったような天然ウラニウムを用いる原子炉を経由して作る。原子炉の中の中性子がウラニウム238に捕獲されてウラニウム239になり，これが放射線を2回出してプルトニウム239になる（後述の〈5－19式〉参照）。プルトニウムはウラニウムとは化学的に違う元素であるから，天然ウラニウムの中から分離するのに，化学的方法が使え，工程が容易である。フェルミがはじ

めて原子炉を作ったのは，このようにしてプルトニウムを作る目的もあったとのことである。このプルトニウム 239 も核分裂を起す性質があるわけである。

原子爆弾の材料には，以上のようにウラニウム 235 とプルトニウム 239 があるが，現在原子力発電などの動力利用に使われているものにはウラニウム 235 が多く，その分離方法は，素焼きのような細かい穴を通す方法によっているようである。この方法はウラニウムを多量に分離するのに都合がよいためである。この方法をガス拡散法とよんでいる。

平和利用があとになった　核分裂による連鎖反応の利用が，平和的な動力利用でなくて，いきなり爆弾として人類の上に落され，おびただしい犠牲者を出したことは，ほんとうに悲しいことであって，人道上深く反省すべきことである。しかし次のことを考慮する必要がある。動力利用を行なうには，連鎖反応の速さを制御する必要があるが，爆弾ならばその必要はまったくなく，あとは野となれ山となれですむ。爆弾の方が技術的にひどく簡単なのである。技術的に簡単な方が早くできる。つまり動力利用よりも，爆弾の方が早くでき上るのは自然なことでもあった。ここでいいたいことは，ここに科学技術の冷厳さが見られるということである。科学技術というものが冷厳であればあるほど，人類に人間的反省が要求されると思う。

原子爆弾の出現のあと，原子力の平和利用がすすみ，原子力発電その他の利用がどんどん進展している。それについては第 6 章以下に述べることにする。

第2章　物質の構造

――原子・原子核――

原子力の応用は，原子核物理学が生んだものである。原子核物理学は物質の構造について人類が長く研究してきて到達したものである。したがって，その歴史をふりかえってみれば，原子力の応用が自然科学の中でどのような立場を持っているかを了解することができるであろう。

§1　連続体説と粒子説

論争の発端　物質の構造についての論争は，まずギリシアで紀元前400年頃，連続体説と粒子説とがあったことが記録に残っている。この二つの説がその後どのように展開されたかということは，自然科学というものがどのようなものであり，また，どのように発達したかということを根本的に示すよい例であると思う。さらには社会科学のあり方についてもヒントを与えるものであると思う。

記録には残っていなくても，人類は，ギリシア以前から，身のまわりの物質，たとえば水，木材，金属，自分の体などについて，それらが何からできているのか，これらのものの性質の違いは何から生まれるものであろうかということについて絶えず考えたり話し合ったりしていたにちがいない。しかし，このような討論が行なわれるためには必須の条件がある。人間の生活にある程度の余裕がなければならない。生活を維持するため狩猟に明け暮れ，あるいは外敵との戦いに毎日心を砕いていては，とてもこのような討論をしている暇はないであろう。農耕生活に入っても，生活の余裕を持つことは容易ではあるまい。狩猟方法の進歩，農耕牧

畜の方法の進歩を技術の進歩というならば，この技術の進歩によって，人類の生活はだんだんと余裕を持つようになったのであろう。それでも，だれでもが物質の構造とか哲学の問題について討論する余裕を持ったとは考えられない。社会制度が生んだ貴族とか権力者が生活の余裕を持ち，みずから討論するか，あるいは思索にすぐれた人を庇護して，討論を行なわせたのであろう。私がここでこのようなことを述べるのは，自然科学の研究は，人類が作り出した生活の余裕に依存する面があることをいいたいからである。一方，現在では，このようにして生まれた自然科学が，逆に人類の生活の余裕を作り出す役目をしつつある。自然科学は人類の余裕を作るために必要であるとされている。つまり人類の余裕と自然科学とは原因が結果になり，結果が原因となる関係になっている。

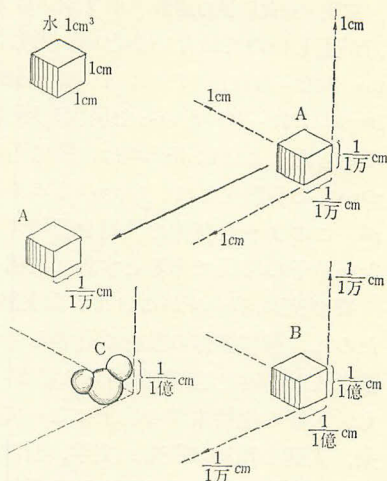
連続体説の勝利　紀元前5世紀にギリシアのレウキッポス（Leucippus，前440頃活動）やデモクリトス（Democritus，前460頃―370頃）が，物質はすべて目に見えない基本的な粒子から成り立っているという粒子説を唱え，この粒子を原子とよんだ。レウキッポスらの考えは，現在わかっている原子構造に相当に近いものである。ただし，これは考えであって，実験的証明をともなうものではなかった。

このあと，紀元前4世紀になって，同じくギリシアのアリストテレス(Aristoteles，前384―22)が連続体説を出した。目に見ることのできない原子のようなものを考えて物質の構造を考えるのはいけない，むしろ，感覚に訴えることができるところの「熱，冷，乾，湿」を基本として物質の性質を考えるべきだというのである。もちろんこの考えにも実証的根拠はないわけである。

連続体説と粒子説を図示すると〔2-1図〕のようになる。例として水1 cm^3をとってみよう。これから1辺が1万分の1 cmの立方体を切りとってみる。これがAである。このAからさらに

1辺を1万分の1にして，1辺が1億分の1cmのもの，Bを切りとってみる。このようにしてどこまで切りとっても立方体であるというのが連続体説であり，どこかでCのような粒子になるというのが粒子説である。現在の知識では1辺が1億分の1cmくらいになると物質は粒子となる。

2-1図　水を小さく分けてみる

レウキッポスの粒子説もアリストテレスの連続体説も，いずれも実証をともなっていないので，論争によってその当否を決めることはできないはずのものである。にもかかわらず論争はアリストテレスに有利であったようで，そこには社会的，宗教的な原因があったのであろう。ことに中世になってからは，物質観ばかりでなく，一般にアリストテレスの考え方以外はすべて「誤り」とされたために，粒子説はほとんど消えていた。とはいうものの紀元前1世紀にルクレチウス (Lucretius, 前95頃—55) が書いた「物質の本性」という詩にはレウキッポスらの粒子説の内容がくわしくうたわれているということである。

さて，このようにして粒子説と連続体説の論争は，このままで約2000年もの間放っておかれたのである。粒子説の方が真実であることに人類が気がつきはじめたのは，17世紀のことである。それから現在まで，たった300年しか経っていない。2000年間のストップと，300年の間の，現在に至るまでの急激な進歩。これはどのような事情によって起ったのであろうか。

実験・観測器機の進歩　ギリシア以来の論争について，粒子説の方が正しいのではないかといい出したのは，ニュートン（I. Newton, 1643―1727），ガリレイ（G. Galilei, 1564―1642），ボイル（R. Boyle, 1627―91）といった現代物理学の始祖ともいうべき人たちであった。ことにボイルは，閉じ込められた空気の圧力と体積についての実験をして，いわゆるボイルの法則を発見したのであるが，このような気体の性質を理解するためには，気体が目に見えない粒子の集団であるとすれば説明しやすいといっていたという。

17世紀にボイルがこのような実験研究を行なえるようになったのは，機械製作の技術が進歩したためであった。機械技術の発達は14世紀の文芸復興（ルネサンス）からはじまっている。文芸復興そのものも，人類の生活水準の向上によって起ったことであろう。その結果，人間の精神は芸術，文学，哲学に向って自由にはばたき始めた。その中で航海に必要な測量機械の技術が進歩し，これが各種の測定装置の発達をうながしたということである。ガリレイが利用した天体測定装置もこれによって作られ，ボイルが気体の研究をしたときの真空装置や真空ポンプもこれらの機械技術の発達によるものである。ボイルはフックという，機械製作にすぐれた技術を持つ人から研究の助手としての協力を得ている。

物質構造の粒子説が脚光をあびはじめたのは，このように，現代物理学の創始者によってであったが，粒子説が決定的となったのは次の節で述べる化学の発達によるものである。

§2　錬金術と化学の発達

錬金術　現在の化学は，歴史的にみると，中世ヨーロッパの錬金術の発達によって生まれてきたものといってよい。錬金術とは，王侯が鉛を金に変えて経済的利益を得たいと考え，金属を扱う技術を持つ人をやとって研究させたことから始まったとされているもので，紀元4世紀の頃からあったものである。この技術者を錬

金術師といい，金属を薬品に溶かしたり，また精製したりしていたものである。8世紀には硝酸や硫酸の製法も発明されている。錬金術師の涙ぐましい努力にもかかわらず，ついに鉛は金にならなかった。しかしこのために，金属その他の物質を他の物質に変化させる，いまでいえば化学処理の技術が進歩して，化学が発達する素地が生まれたわけである。

化合物の成分比　化学研究の進歩によって，18世紀には水素や酸素が発見されている。そして，いろいろの物質の中には分解することができないものもあるが，なかには，いくつかの成分に分解できるものがあることがわかってきた。分解できるものはいまでいう化合物であって，化合物はその成分が化合してできていることになる。

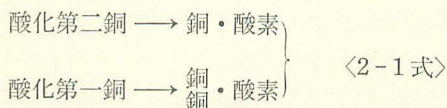
化合のときの，化合物と成分の質量比を測っているうちに，成分と化合物との質量比はいつもきちんときまっているということがわかった。いまにして思えばあたり前のことであるが，当時の研究者にとっては驚くべきことであったろう。化合物と成分の質量比を，銅とその酸化物の場合でみてみよう。銅が酸素と化合すると，黒色の酸化第二銅と赤色の酸化第一銅ができる。このふたつの場合の質量比は次のようになっている。

	〔酸化銅の質量〕	〔銅 の 質 量〕	〔酸素の質量〕
酸化第二銅の場合	10	8	2
酸化第一銅の場合	9	8	1

この中で，酸素の質量については，当時の技術では，正確に知ることはむずかしかったであろう。しかし酸化銅の質量から銅の質量を引き算して求める方法もあるわけである。

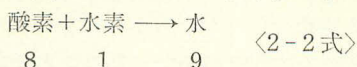
基本粒子の存在　酸化銅の化合物の質量比を見ると，成分の質量比がきまっているほかに，銅と酸素の割合が酸化第二銅のときに8対2であり，酸化第一銅のときに8対1であって，この割合の違いが，ちょうど2倍だけになっている。このことは，次のよう

に考えるとうまく説明できる。銅は銅の基本粒子からできていて，酸素も同様に基本粒子からできている。それを銅と酸素であらわせば，2種類の銅の化合物が次のように基本粒子の結合したものであると考えるとよいのである。

酸化第二銅 ⟶ 銅・酸素
酸化第一銅 ⟶ 銅銅・酸素　〈2-1式〉

ここで銅の基本粒子と酸素の基本粒子の質量の比は8対2であることになる。

このような基本粒子を物質が持っているならば，ギリシアのレウキッポスらの粒子説が正しいということになり，アリストテレスの連続体説は誤りということになる。

化合物と成分の質量比としてわかりやすいものは水である。

酸素＋水素 ⟶ 水
8　　1　　9　〈2-2式〉

酸素と水素が化合して水になるときの質量比は8：1：9になっている。この例では，成分は気体であり，水も化合するときには気体であって，その質量を測定することはむずかしく，実験事実としてあげるにはあまりよくない。しかし，これも物質が基本的な粒子のあつまりであることを示す例であって，酸素の基本粒子と水素の基本粒子の質量比は 8：1 ということになる。しかし，水ができるときに，実は二つの水素の基本粒子が参加していることがあとになってわかったので，酸素と水素の基本粒子の質量比は16：1ということになっている。

仕事場の伝統　紀元4世紀頃に出発した錬金術が次第に形を変え，発展して化学となり，18世紀になってここに述べたような結論を導き出すまでの長い年月の間には，多くの研究者のたいへんな苦労があったことであろう。この苦労の実際を知るために文献をあさることはまことに興味深いことであろうが，私などにでき

ることではない。たとえ文献を読んだとしても，研究者の苦しみが必ずしもありのままそこに書かれているかどうかは疑問である。ただ，私のように物理学の実験研究を30年以上もやっていると，粒子説が浮び上るまでの長い年月の間の研究者の努力と苦しみを，自分の経験から察することができるのである。

錬金術師や化学の研究者が仕事をした場所を英語では laboratory といっている。英国の歴史的に名高い Cavendish Laboratory（ケンブリッジ）や Clarendon Laboratory（オックスフォード），あるいは原子核物理学や素粒子物理学の尖端をいく米国の Lawrence Radiation Laboratory や Brookhaven National Laboratory など，“laboratory”はいずれも日本語では「研究所」と訳されているのだが，直訳すれば「研究所」でなく，「仕事場」であろう。錬金術から出発して物質の粒子説を浮き上らせるまでの研究が「仕事場」で行なわれてきたということの中に，この間の研究者たち――というよりもむしろ仕事師とか働き手といった方がふさわしいであろう――が，どんなことを，どのように苦労したかがしのばれると思うのである。

実証科学の進歩　文芸復興以前に物質の連続体説がゆるがなかったのは，それが正しいからというよりも，当時支配的だったスコラ哲学がアリストテレスの考え方をとっていたからであろう。これに対して，錬金術師など「仕事場」の「高級職人」たちは，遠慮勝ちに批判的な言葉を投げていたということである。17世紀あたりからそうした「仕事場」の人たちと，科学的思考をする人たち，たとえばニュートンやガリレイのような人たちとが手を結ぶようになって，今日の実証科学の花が咲きはじめたのである。

それ以来まだ300年しか経過していない。実証科学の精神がないときの2000年の停滞と，実証科学の精神が出てからの300年の間の驚くべき進歩に思いをいたすべきである。しかしその結果「原子力」は人類に益をもたらしたと同時に，ぬぐいがたい大き

な悲惨をももたらした。この害の方は必ずしも科学自身ばかりにその責任があるとはいえない。人類社会の進歩があまりにも遅いことにも関係していると思う。つくづく考えるのは，社会を進歩させて平和で文化的なものにするために実証科学の精神を用いることはできないものであろうか，ということである。

§3　原子説——原子の種類と原子番号

化合の法則　前の節で化合物とその成分について述べたことを整理すると，次のようになる。

① 成分から化合物ができるとき，質量はふえることもへることもない。これを質量保存の法則といって，1772年にラヴォアジエ（A. L. Lavoisier, 1743—94）が確立した。

② 化合物とその成分の質量比は同じ化合物ではいつも同じである。これは定比例の法則といって，1792年にリヒテ（J. B. Richte, 1762—1807），1797年にプルスト（J. L. Proust, 1754—1826）が確立した。

③ 同じ成分から作られる化合物にいくつかの種類があるときには，成分比の違いが前節の〈2-1式〉の例にみるように，いつも整数の比になっている。これを倍数比例の法則といって，1802年にドルトン（J. Dalton, 1766—1844）が確立した。

原子説　これらの法則の上に立って，1808年にドルトンは「原子説」を出した。純粋な物質は原子という目に見えない小さな基本的な粒子からできていて，化合物はこの原子が結合することによって作られるというのである。ギリシア時代のレウキッポスの粒子説が完全によみがえってきたことになる。

「純粋な物質」というのは水素，酸素，銅などの「元素」である。前節で基本粒子の質量比といったものが，原子説では原子の質量比になる。したがって元素の原子の質量比を決定することができるわけで，原子の一部についてその質量の軽い方からならべると

〔2-1表〕のようになる。

この表で，原子量というのは，原子の質量比を仮りに炭素の同位元素の $^{12}_{6}C$ の質量を 12.0000 としてあらわしたものである。実際の物質の原子は原子核の中の中性子の数が異なる同位元素のあつまりであるが，表では同位元素の混合物についてのものである。炭素は $^{12}_{6}C$ と $^{13}_{6}C$ のあつまりで，$^{13}_{6}C$ が少ないために 12.011 となっている。また，原子番号とは，原子をその質量の順序にならべてつけたものであるが，それだけでなく，ほかの大きな意味につながることはあとで述べる。

元　素	符号	原子番号	原子量
水素	H	1	1.0079
ヘリウム	He	2	4.0026
リシウム	Li	3	6.939
ベリリウム	Be	4	9.012
ホウ素	B	5	10.811
炭素	C	6	12.011
窒素	N	7	14.007
酸素	O	8	15.999
フッ素	F	9	18.998
ネオン	Ne	10	20.179
ナトリウム	Na	11	22.990
……	……	……	……
銅	Cu	29	63.546
……	……	……	……
銀	Ag	47	107.87
……	……	……	……
水銀	Hg	80	200.59
……	……	……	……
ウラニウム	U	92	238.03

2-1表　原子量と原子番号

原子の重さ　原子量は原子の質量の割合を示すもので，原子のほんとうの質量を示すものではない。ほんとうの質量は原子量をグラムであらわしたものを 6.023×10^{23} で割ったものである。つまり炭素 12.011g，水素 1.0079g などの中にそれらの原子が 6.023×10^{23} 個あるというのである。この数は原子物理学にとって大切な数で，アボガドロの数といって L であらわす。この数の大きさの概念を示すと，1億が1億あつまり，さらにそれが1億あつまると $10^8\times10^8\times10^8=10^{24}$ となるわけであるが，L はこれに近い。

ここで述べた酸素原子の 15.999g，水素原子の 1.0079g を酸素原子や水素原子の1モルとよぶ。いいかえると酸素原子などが 6.023×10^{23} 個あつまったものの質量が1モルである。

原子の大きさは，前に述べたようにおよそ 10^{-8} cm（1億分の1

センチ）である。原子の大きさや質量をどのようにして知ることができるかについては，ここではふれないことにする。

2-2図
同じ体積の中に同じ数の原子（分子）があると，同じ温度では同じ圧力になる

気体の圧力と原子・分子の数　さて，原子は気体になるときに，一つ一つでとびまわることもあるが，いくつかの原子が結びついて分子になってとびまわることがある。そして，〔2-2図〕のように，原子にしても分子にしても，同じ体積の中に同じ数の粒子が入っていると，同じ温度ならば同じ圧力を示す。圧力は粒子が壁にぶつかってこれをたたくことによって起るので，粒子が重く，その速さが大きければ圧力は大きくなるわけだが，粒子の重さが違っても，同じ温度ならばその平均の運動のエネルギーは同じになる。粒子の質量が m，速さが v ならば運動のエネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ であるから，m が大きい分子では速さが小さくなる。このためにどんな分子や原子でも同じ温度で，同じ体積の中に，同じ数の粒子があれば，同じ圧力を示す。このために温度が0度(℃)で1気圧の $22.4\,l$ の体積をとると，その中にある分子や原子の数は，どんな気体でも同じ数になり，前に述べたアボガドロの数 L 個になっているのである。

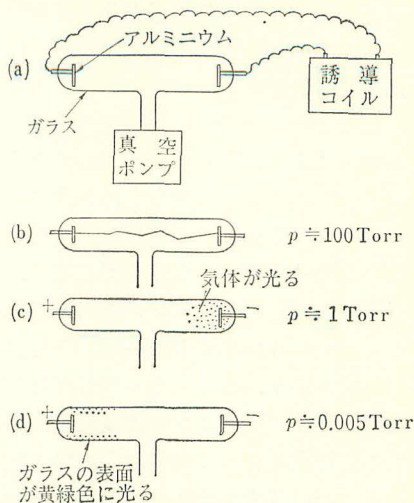
§4　原子がこわれる――陽子と電子

アトムをこわす　原子は英語で“atom”というが，これはギリシア語で「もうこれ以上分割できない」という意味からきているということである。レウキッポスらは文字通りもうこれ以上分割できない最後の粒子として原子を考えていたのであろう。

しかし「仕事場」での研究は，この最後粒子ももっと小さいも

のにこわれることを発見してしまった。ドルトンの原子説は1808年に出たのであるが，それからほぼ50年あとにいわゆる「ガイスラー管」が作られ，この中の電気放電をしらべているうちに，原子がこわれることがわかってきたのである。

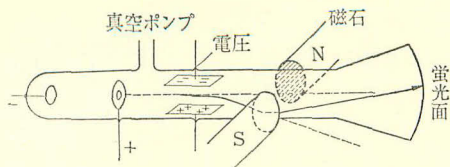
2－3図　ガイスラー管

ガイスラー管　ガイスラー管は，いまでも小学校や中学校の理科実験室にある。〔2－3図〕のように，直径 2 cm くらいのガラス管の両端にアルミニウムの電極を入れ，真空ポンプで空気を抜く。二つの電極には誘導コイルによって約3万ボルトの電圧をかける。真空ポンプを働かせないと，ガラス管の中の圧力は1気圧，水銀柱で760 mm である。これを760 Torr というが，この圧力では誘導コイルの電圧をかけても放電は起らない。しかし真空ポンプを働かして圧力が約100 Torr になると，図の (b) のように二つの電極の間に雷に似た放電が起る。さらに約 1 Torr になると，全体に放電の光がひろがり，気体から出る光はそれぞれ気体によって違う特有な色を持っている。さらに圧力が下って約0.005 Torr になれば，気体に特有な色は消えて，ガラスの表面が美しい黄緑色に光るようになる。このようなガイスラー管の放電から，原子物理学にとって大切なことが実に多く発見された。気体に特有な色からは光の線スペクトルが発見され，これは原子構造と量子力学の発展につながっている。さらにこのような放電

から，あとで述べる陽子が発見された。またもっと圧力が低くなって，ガラスの壁が黄緑色に光っている現象から，電子とX-線が発見されている。

このようにたくさんの発見の端緒となったガイスラー管の実験が可能になるためには，多くの技術的な発展が必要である。第一に，ガラスがなければならぬ。次には，電極として適当な金属がなければならぬ。この電極の導入線をガラスに封じて空気が洩れないように気密にする技術が必要である。さらに，真空ポンプが必要である。真空ポンプは，17世紀のなかばにドイツのゲーリケ（O. von Guerike, 1602—86）や英国のボイルが開発したのがはじめであるが，ガイスラー管が作られたのはそれから200年ほど経った頃で，真空ポンプは水銀をうまく使ったものであった。もちろん現在のように便利なものではなかったが，そこまで発達させるために研究者は多くの苦労を重ねたであろう。もうひとつ，誘導コイルについては，その発明の歴史をくわしく知らないのだが，やはり長い間にわたって多勢の高級職人が「仕事場」で苦しい工夫をこらした結果生まれたものであることにまちがいないと思う。

電子の発見　さて，ガイスラー管の放電から電子が発見された事情は次のようである。圧力が 0.005 Torr くらいになってガラス壁が黄緑色に光るのは，何かがあたって光るらしい。というのはガラスに電極などの影を作ることができるからである。そしてガイスラー管に磁石を近づけると，その影は動く。とすれば，壁にあたっている何ものかは，電気を持った粒子であることになる。電流が流れている針金が磁石の間で力をうけるのと同じように理解できるからである。

このような粒子の性質をさらにくわしく調べるためにくふうされた装置が〔2-4図〕である。真空にした容器の中で図の左方の負の電極と正の電極の間に放電を起すと，正の電極の穴からとび

出す線がある。陰極から出発しているのでこれを陰極線とよぶ。陰極線はガイスラー管でガラスの壁をたたいて光を出しているものと同じである。陰極線は，電気の力も磁石の力も加わっていなければ，まっすぐにすすむ。しかし図のように中央の二つの電極に電圧をかけ，その間を陰極線が通るようにすると，陰極線は正の電極の方にまがる。つまり，この陰極線の中の粒子は負の電荷を持っていることになる。また，磁石の極の間を通る場合も方向をかえる。このまがり方からも，この粒子は負の電荷を持っていることがわかる。

2-4図　陰極線は電界と磁界によってまがる

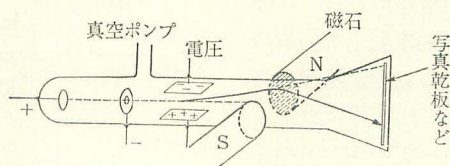
さて，この粒子のもつ質量 m と電荷 e を仮定すると陰極線の速さがわかり，さらに電圧と磁石によるまがり方から，この粒子の質量と電荷の比 e/m を求めることができる。1897 年に英国のトムソンは，陰極線についてこの e/m を測定するといつも一定であることを知り，この粒子に「電子」という名前をつけた。これによって電子の存在が確認されたわけである。

e/m がわかったから，電荷 e がわかれば質量 m もわかることになる。この頃すでに分子は水溶液の中で正と負の電荷をもつイオンに分れることがわかっていた。したがって，たとえば硝酸銀などの電気分解のときの電流をしらべると，原子の中に存在する電荷の最小限を知ることができる。電子はもともと原子の中にあったはずであるから，電気分解から知ることができる電荷を電子の電荷とすることができる。それは，

$$e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ クーロン}$$

であった。これによって m を求めると，

$$m = 9.1 \times 10^{-31}\,\text{kg}$$

となって，これはもっとも軽い水素原子の質量のおよそ2000分の1であった。もっとも軽い原子よりはるかに軽い粒子があらわれたということは，原子がこわれたことになる。原子は最後的粒子ではなかったことになる。

2－5図　陽極線も電界と磁界でまげられる

陽子の発見　次に陽子が発見された事情を述べよう。電子の e/m を測定したと同じような〔2－5図〕の装置を用い，電極の正と負を変えても陰極の穴からとび出す線があることを1886年にゴールドシュタイン (E. Goldstein, 1850—1930) が発見している。これは陽極から出発しているので陽極線と名づけられた。陽極線の e/m を測ってみると，陰極線の場合と違って一定ではない。また陽極線の粒子が持っている電荷は正である。その分量の絶対値を電子の場合と同じものにとると，m は電子よりはるかに重い。いろいろの m の中でもっとも軽いものは水素原子の実際の質量と一致している。これが「陽子」である。これで陽子の存在がはっきりした。

このようにしてはっきりした陽子と電子の質量と電荷を〔2－2表〕に示す。

原子の中に陽子と電子があることはわかったが，それではこれ

	1個の電荷	$L=6.02\times10^{23}$個あつまったときの電荷	1個の質重	$L=6.02\times10^{23}$個あつまったときの質量
電子	-1.60×10^{-19} クーロン	-96487 クーロン	9.1×10^{-31} kg	$\frac{10^{-3}}{1840}$ kg
陽子	1.60×10^{-19} クーロン	$+96487$ クーロン	1.67×10^{-27} kg	1.008×10^{-3} kg

2－2表　電子と陽子の電荷と質量

らの粒子は原子の中にどのように存在するのか，つまり原子はどのようにできているのだろうか。

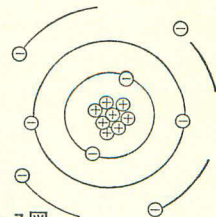
§5　原子の構造――原子の中の力

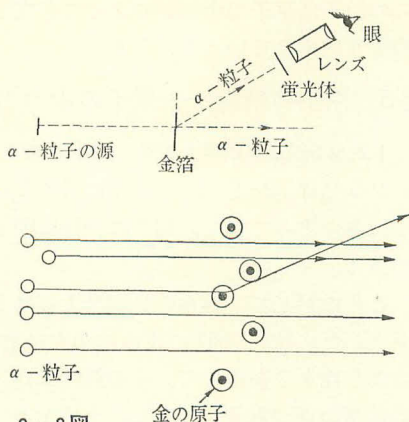
トムソン説と長岡半太郎説　原子の構造について，まず英国のトムソンらは〔2-6図〕のように考えた。中央に負の電荷を持つ電子があつまっていて，周囲に一様に陽子が分布しているというのである。

これに対して，日本の長岡半太郎は1903年に次のような考えを出した。〔2-7図〕のように中央に重くて正の電荷を持つ「芯」のようなものがあって，その周囲に負の電荷を持つ電子が分布し，土星をとりまく輪のようになっているというのである。

2-6図
J. J. トムソンの原子模型。正電荷が外側に，負電荷が中心にある

この二つの考えのどちらが正しいのか。その結着は10年もたたぬうちに，すなわちラザフォードが1911年に発表した実験によってつけられた。

ラザフォードの実験　ラザフォードは〔2-8図〕に示すような実験を行なって，ラジウムのような放射性物質から出てくる α-粒子をうすい金箔にあて，その散らばり方をしらべた。α-粒子は金の原子に衝突したときに方向を変えるに相違ないが，方向を変えた α-粒子の中には，相当大きく角度を変えるものがあった。この事実を説明するためには，α-粒子は，重くて非常に小さく（10^{-15} m くらい），正の電荷を持つも

2-7図
長岡，ラザフォードの原子模型。正電荷が中央に，負電荷がそのまわりを回っている

のによって押し返されたと考えざるを得ない。α-粒子は正の電荷を持っていることがわかっているから，正の電荷を持つかたまりに押されるわけであるが，散らばった粒子の角度の変わり方からみて，この正の電荷を持つ二つのかたまりは図のように小さい距離まで近づいたことになる。このためには金の原子の中に小さなかたまりがなければならぬ。原子の大きさは10^{-10}mくらいであるから，正の電荷を持つかたまりは原子全体からすればひどく小さいものである。

2－8図
ラザフォードの実験。α－粒子は金の原子と衝突してどんな運動をするか

原子構造の決定　このようなことがわかると，トムソンの考え方は駄目で，長岡の考えが正しいことになる。それで〔2－7図〕のようなものを長岡・ラザフォードの原子模型という。外国ではボーア・ラザフォードの原子模型ということもある。

これで原子の構造についての大すじがきまった。つまり，原子の中心には，重くて原子の質量の大部分をしめ，正の電荷を持つ「芯」ともいうべきものがある。これを「原子核」とよぶことになった。「芯」のまわりを電子がとりまいている。これは「芯」のまわりの「衣」とでもいうことができる。そして「芯」の持っている正の電荷と「衣」が持っている負の電荷は絶対値が等しいので，全体としては中性になっている。

このような構造は，ラザフォードが実験した金の原子に限るものでなく，〔2－1表〕に示すようなあらゆる種類の原子について

いえることである。ラザフォードが実験に使った α-粒子は，ヘリウムの原子核であることになる。また，水素の原子核は陽子である。こうした原子の構造を概念的に書いたものが第1章の〔1-1図〕である。

2-9図

摩擦電気を持つ紙片は，電気力によって引き合ったり離れたりする

2-10図　電荷同士の間に働くクーロン力

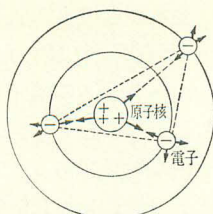
原子の中の力　さて，当時はまだ中性子が発見されていないので，原子の中には陽子と電子があるとするわけであるが，研究者たちの次の課題は，これらの粒子がどんな性質を持ち，互いにどんな力を及ぼしあって原子構造の秩序が保たれているかを明らかにすることであった。

陽子や電子はそれぞれの質量のほかに電荷を持っている。電荷を持つもの同士の間には，クーロンの法則であらわされる電気力が働く。電荷同士の間に働くクーロンの法則とは〔2-9図〕のように，摩擦電気によって電荷を持つものの間に働く力によってたしかめられているものである。〔2-10図〕のように電荷を q と q' とすると，電気力は同種ならば（つまり正と正，あるいは負と負ならば）斥力となり，異種ならば（正と負ならば）引力となる。両者の距離を r m，電荷 q と q' をクーロンで測り，力をニュートンであらわすと次のようになる。

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2}=9\times10^9\frac{qq'}{r^2}\quad(\varepsilon_0=8.85\times10^{-12})\quad\langle 2\text{-}3\,式\rangle$$

この力の方向は二つの電荷を結ぶ直線の中にある。また q が q'

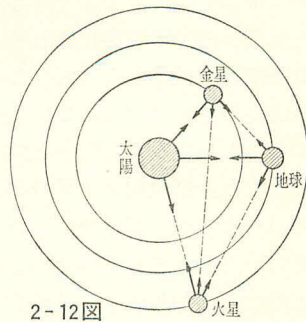
2-11図
原子核と電子は電気力で結ばれる

に及ぼす力と q' が q に及ぼす力とは大きさが同じで方向が反対である。二つのものが及ぼし合う力にこのような関係があることを「作用反作用の法則」という。またここで力の単位に使ったニュートンは，地球上で 1 kg の物体がうける重力が 9.8 ニュートンになるような単位である。

原子の中で電荷が及ぼし合う力は〔2-11図〕のようになる。まず原子核の正電荷と周囲の電子との間には引力が働き，電子同士の間には斥力が働いている。しかし原子核には正の電荷が集中しているので，原子核と電子の間に働く力が大きい。そして電荷と力の大きさの関係は〈2-3 式〉のようだとするわけである。〈2-3 式〉は摩擦電気の実験のように 1 cm とか 10 cm とか離れたところで実験してきめたものであるが，この法則がそのまま原子の内部のように1億分の1 cm といった小さなところでも成り立つとしているわけである。

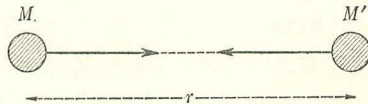
このようにして，原子の中で働いている力がわかると，原子の構造についてもさらに立ち入ることができる。だがその前に，万有引力について述べておこう。

万有引力　原子核とそのまわりの電子が力を及ぼし合っているありさまは，〔2-12図〕のように，太陽系の太陽と惑星の関係に似ている。ただし，原子の大きさと太陽系の大きさは 10^{21} 倍という大きい違いがある。この図には地球のほかに惑星を二つだけ書いてある。これらの天体は互いに万有引力を及ぼし合っている。万有引力は，〔2-13図〕のように，質量 M と M' があるときに必ず引力として働くもので，M と M' を kg，r を m，力 F をニュートンであらわせば，

$$F = G\frac{MM'}{r^2} \quad (G = 6.7\times10^{-11}) \qquad \langle 2\text{-}4\ 式\rangle$$

となる。力の方向は二つの質量を結ぶ直線の中である。このときにも電気のときと同じように作用反作用の法則が成り立っている。万有引力は太陽系では太陽と惑星の間だけでなく，惑星同士の間にも働く。これも原子の場合に似ている。また惑星と太陽との間の力の方が惑星同士の間の力にくらべて大きいことも，原子の事情に似ている。

2-12図
太陽系は万有引力で結ばれている

2-13図　質量の間に働く万有引力

原子の中の万有引力　万有引力は，ニュートンがリンゴが木から落ちるのを見て発見したと言われている。万有引力は，リンゴと地球，あるいは天体同士，すべて質量を持つものの間に働くのである。ところで原子の中の原子核や電子も質量を持っている。原子の内部で万有引力はどうなっているのであろうか。

水素原子の場合について考えてみよう。水素原子の陽子と電子の間に働く電気力と，万有引力とをくらべるには，距離は同じであるから，〔2-2表〕の陽子と電子の電荷や質量を〈2-3式〉と〈2-4式〉に入れてみるとよい。そうすると，なんと万有引力の方は電気力の 10^{-40} 倍で1億分の1を5回もくりかえすほど小さい。したがって，原子の構造を考えるときには万有引力を考える必要はまったくないといってよい。

このように，その中で主になっている力は違うのだが，太陽系と原子はよく似ている。芯になっているものが重くて，「どしっとしている」ことも，芯をとりまくものがお互いに力を及ぼし合

ってはいるがその力よりも芯に向う力の方が強いことも，さらにそれぞれの力の法則を表わす式が似ていて，どちらも力は距離の2乗に反比例することも。このために，電子の軌道と惑星の軌道はよく似たものになっているのである。

しかし，太陽系と原子とでは根本的に違う点がある。太陽系では，たとえば地球と火星の間には惑星がないが，これは，あることができるのに偶然ないとされるのに対して，原子ではそうでなくて，あるきまったいくつかの軌道以外には電子は存在しない。このことは物理学の「量子力学」に関係することであり，エネルギーにも関係するので，あとで述べることにする。

原子核の中の力　原子の中の力については，さまざまな問題があったとはいえ，しだいに話のすじ道がついていったのであるが，「芯」にあたる原子核の中の力については話が簡単でなく，その構造についての研究はおくれた。その困難のひとつを示そう。

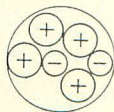
例をヘリウムの原子核にとる。つまり，α-粒子である。すでに述べたが，α-粒子はその質量は陽子の4倍であり，電荷は2倍である。質量を説明するためには，現在のように中性子が知られていないときには，陽子4個を持ってくる必要がある。それでは電荷が陽子の4倍になってぐあいが悪いので，電荷を打ち消すために電子2個を加える。つまりα-粒子は〔2-14図〕のようになる。

α-粒子の中の粒子は，非常に固く結びつけられていることがわかっている。原子の中の電子が原子核に結びつけられている様子にくらべてひどく固くて，少々の刺激では離れないのである。この固い結びつきは何からきているのだろうか。

⊕-----陽子

⊖-----電子

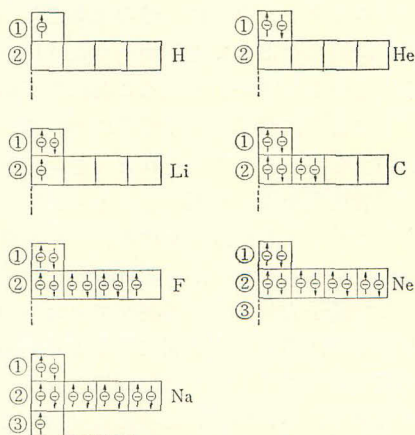
2-14図
中性子が発見される前のα-粒子についての考え方

〔2-14図〕の中の陽子と陽子は反撥しているはずである。電子と陽子は引き合うであろうが，それでは固い結びつきを説明できそうにもない。これには物理学者も困りはてていた。1932年に中

性子が発見されてからは，これを原子核の構成粒子に加えると話が簡単になることがわかり，物理学者が元気を出したことはすでに述べた通りである。

§6　物質の性質——原子の集団

原子力の問題は，もともと原子核に関係したことである。しかし，それを原子自身が持っている問題と比較する立場からとらえるとよく理解することができるので，本書では一貫してその立場をとりたい。

元素の性質をきめるもの　もともと原子とは物質の性質を考えているうちに出てきた考えである。原子の構造の考え方がはっきりすると，それによって原子の性質の違いを説明できる可能性が出てくる。原子が最後の粒子でなく，その部分にこわれ，その構造がわかると，元素の性質の違いを原子の構造から出発して理解できるようになったのである。

たとえば水素，ヘリウムなどの元素の化学的性質の違いは〔2-15図〕のように説明できる。「量子力学」によると，原子の「衣」の中に電子があるときに，その席はきまっている。前にも述べたように太陽系の惑星の軌道がいわば偶然にできあがっているのに対して，原子内部で電子が入ることができる軌道は段階的にきまっており，それに

2-15図　原子の殻構造と電子の席を示す。原子の中では電子の席がきまっている。矢印は電子の自転の方向である。

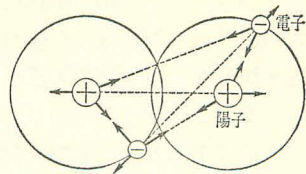
エネルギーの低い方から①，②，③……と番号をつけると，①には席が一つあり，②には席が四つある。一つの席に電子は二つだけ入ることができる。電子は，原子核もそうであるが，地球のように自転していて，その自転の向きが上向きのものと下向きのものと，1組の二つまでが一つの席に入ることができるのである。

このようにして席に一つの電子が入ったのが水素であり，ヘリウムの場合になって原子核の電荷がますと，①の席にもう一つの電子が入り満員になる。次の②の席に電子が一つ入ったものがリシウムであり，さらに，たとえば4個入っていれば炭素である。②の席が満員になるのは電子が合計10個入ったネオンであり，電子が一つだけ空席のものはフッ素である。③の席に電子が1個入るとナトリウムになる。

さてここで，①や②の席がちょうど満員になったヘリウムとかネオンは貴ガスといって，他の元素とはなかなか化合しない。①や②の席が満員になって，その次に1個だけ電子が入ったリシウムやナトリウムは，他の元素とたいへんに化合しやすい。また，満員になるのに電子が一つだけ足りないフッ素なども他の元素と化合しやすい。水素もこれに似ている。

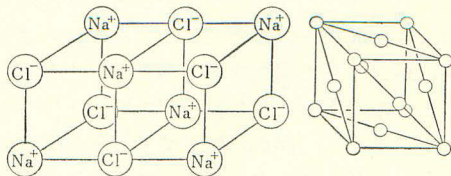
このように原子の中の電子について，①の席，②の席，③の席というものを考えて，これを「殻構造」という。殻構造は元素の化学的性質をよく説明でき，もっと重い元素にまで適用できる。いきなりこうした説明をすると，何か魔法使いのやり口のようにみえるかもしれないが，実はこれは量子力学の結果なのである。ここで量子力学について説明できないのは残念であるが，殻構造が元素の性質をよく説明できることから，この量子力学の考え方が正しいものだということが示される。量子力学の結果は事実に一致する，いいかえれば実験に合致しているのである。

原子構造がはっきりしたことの成果に水素分子の問題がある。水素では二つの原子があつまって分子となることは，化学の発達

の初期からわかっていた。しかし，その結合のようすがはっきりしたのは，原子の構造がわかり，量子力学が発達したあとの1928年頃のことである。

2-16図　水素分子における結合

〔2-16図〕は二つの水素原子が結合して分子になっているところを示す。二つの原子の中には陽子が2個，電子が2個ある。これらはみんな図のように電気力を及ぼし合う。一つの粒子は他の3個の粒子から力をうけている。その結果として水素原子が結合して分子になっている。このときに二つの電子が自転しているが，それらは互いに反対向きに自転していなければならないということが，結合のたすけになっているのである。

電気力による結合　ここに水素分子の例を出したのは，原子自身の中の結合力は電気力であるが，さらにいくつかの原子があつまったときの相互の間の結合力も，すべての場合に電気力であることを述べたかったのである。

〔2-17図〕は原子があつまって物質を作っている例である。左側は食塩で，Na 原子と Cl 原子が立方体にならんでいる。このときも原子が結合している力は原子の中の陽子や電子が他の原子の中の相手と及ぼし合っている電気力である。食塩の場合には Na 原子から Cl 原子に1個の電子が移動した形になっている。電子が少なくなったり多くなったりしたものをイオンというので，食塩のようなものをイオン結

2-17図
原子があつまって物質を作る

晶という。右側は銅の結晶における原子のならび方を示している。この場合にも銅の原子が結び合っているのは，原子の中の陽子や電子が隣りの原子の中の陽子や電子と力を及ぼし合っているためであることに変りはない。

ここで水素分子，食塩，銅について述べたことはすべての物質にあてはまる。銅の金属としての性質も，食塩のしおからさも，ひいては水の流動性も，岩の固さも，すべてどのような原子がどのように結びついているかによってきまるのである。そして原子が結びつくときには，原子の中の電荷による電気力が出発点になっている。いわば電気力が糊のようになっているのである。

いま電気力を糊にたとえたが，この糊は場合によって非常に強いので，金属は強く，岩は固くなる。この電気力にくらべて，結晶の中で原子と原子が及ぼし合っている万有引力はきわめて小さいものであることが，前節で水素原子について述べたことから想像できる。しかし，実際の金属や岩などすべての物質は重力を感じる。これらの重力は，地球というきわめて大きな物体が物質の中の一つ一つの原子に及ぼす万有引力を加え合せたものである。原子同士の万有引力は小さくても，地球はきわめて大きいので，地球による万有引力は目立ってくるわけである。

物性物理学と生物物理学　このように，すべての物質を原子の集団とみて，原子の性質から出発して物質の性質を説明する物理学の分野を物性物理学とよんでいる。物性物理学はすでにいくつかの大きな成功をおさめている。その例のひとつに，銅やアルミニウムがどうして電気を導くかということがある。〔2-17図〕の右のようなぐあいに銅の原子がならぶと，銅の原子の「衣」の中の一つの電子が「浮かれ出して」原子から離れ，自由に動きまわることが説明できるのである。この電子によって電気が流れることになる。

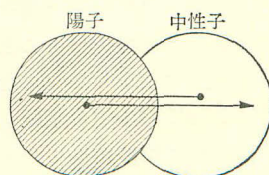
もうひとつの例として，鉄がどうして磁石になるかということ

がある。電子はみんな小さい磁石の性質を持っているが，原子の「衣」の中ではそれが互いに反対の方向を向いて打ち消し合っていることが多い。しかし鉄の場合には，電子の磁石としての性質は打ち消さないで，一方向にそろって効果をあらわして磁石になる。それがなぜかということも量子力学によって説明されている。

原子の集団として最後に述べたいのは生物体についてである。増殖と生長を示す生物体も原子の集団であることにかわりはない。同じ原子の集団でありながらあるものは死んでいて，あるものは生きている。いったいどこが違うのであろうか。よく考えてみると不思議なことである。生命現象を原子の集団として理解しようとする努力が世界各地でさかんに行なわれている。これは生物物理学とよばれているが，この分野にはひとつの困難があると思う。実証科学である以上，実験をしなければならないが，生命を持つものについての実験はかつての錬金術や化学の実験にくらべてむずかしいのである。温度を上げたり乾かしたりすると死んでしまうものを扱うことは容易ではないであろう。

§7　原子核の構造

核力　しばらく原子や電子の集団の話をしてきたが，ここで原子核にもどろう。原子核の中で陽子や中性子を結びつけている力は何だろうか。もっとも簡単な例として重陽子（重水素の原子核）について考えてみる。〔2-18図〕のように重陽子では陽子と中性子が結合しているが，ここでも，原子の中の原子核と電子の間に働く電気力，太陽系の太陽と惑星の間に働く万有引力のように，陽子と中性子は互いに何かの力を及ぼし合って結合しているに相違ない。まずそれが電気力ではないことはたしかである。中性子には電荷がないからである。では

陽子　中性子

2-18図　重陽子の内部

万有引力であろうか。万有引力は原子の場合，結合力としては電気力にくらべてひどく弱かったが，原子核の場合でも弱く，重陽子の結合を説明することができない。とすればこれらとまったく異なる力があるはずである。この力を「核力」という。核力は短距離の間でだけ働くきわめて強い力であって，陽子と中性子の間ばかりでなく，陽子と陽子の間，中性子と中性子の間にも同じように働く。陽子と陽子の間には，電荷同士の間の電気力に加えてこの核力が働くのである。

湯川秀樹博士はこの核力について根本的な考察を行なっているうちに，新しい基本粒子として「パイ中間子」の存在を予言して，ノーベル賞をうけている。

第1章で述べたように，「原子力」といっているものは原子核反応のエネルギーを利用するものであるが，わずかの燃料から多量のエネルギーをとり出すことができるのは，核力が大きくて，原子核の中の結合が強く，結合の変化によって出入りするエネルギーが原子の場合にくらべて非常に大きいからである。このことをもっと立ち入って理解するためには，結合の度合いを，万有引力，電気力，核力の場合についてそれぞれ量的に検討することが必要であるが，それは第3章で行なうことにする。

原子核の性質については，結合の度合い，つまり結合のエネルギー，原子核の形，地球の自転のようなスピン，つまり角運動量，それに加えて安定か不安定かの問題がある。放射性同位元素のように不安定の場合には，その半減期の問題もある。ちょうど原子の性質をその構造から説明したように，これらの原子核の性質をその構造から説明することが原子核物理学の目的である。このためには，サイクロトロンなどの粒子加速器によって作った高速粒子によって原子核を刺激して反応を起させ，出てくる粒子を性能のよい検出器によってしらべるといった研究が，世界の各地でさかんに行なわれている。

原子核の殻構造　原子核の中の陽子や中性子のあり方について，原子の殻構造に相当するような原子核の殻構造というものがある。原子の場合には，原子の中央に「芯」になる原子核があって，そのまわりに電子があり，原子核と電子の間に電気力が働くとして殻構造があるのだが，原子核の中には中心になる「芯」はないし，互いに核力を及ぼし合う陽子や中性子が「ごちゃごちゃ」とあるのであるが，それでも殻構造を考えることができて，相当によく原子核の性質を理解することができる。

原子核の殻構造を〔2-19図〕に示した。原子核では①の席は1個，②の席は3個，③の席は6個であり，各々の席に陽子や中性子が自転の方向が互いに逆である2個ずつが入ることができる。中性子と陽子は種類が違う粒子であるから，それらの席は図のように別々である。

まず陽子の方の席で①の席に一つ入っただけのものが陽子である。これに対し，中性子の席に一つ中性子が入れば重陽子になる。さらに

陽子の席　中性子の席

p

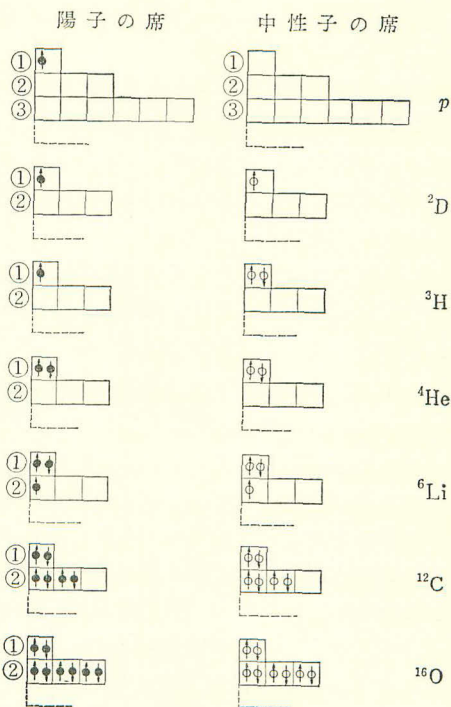
^2D

^3H

^4He

^6Li

^{12}C

^{16}O

2-19図　原子核の殻構造

中性子が①の席に入ると三重水素となる。次に陽子の席に陽子が加わると，①の席は陽子と中性子の両方の席が満員となるが，これが ^{4}He である。このように一つの殻の席が満員になった原子核は固く結びついて安定になっている。さらにすすんで，②の殻の席が満員になったものが ^{16}O であって，これも固く結びついている。このようなことがさらに重い原子核についても言える。

このように殻構造によって原子核の性質を説明することができることは，原子核物理学の成功の一部を示しているものである。

§8 素 粒 子

素粒子の間に働く力　これまで，原子や原子核を作っている基本粒子として，電子，陽子，中性子を考えてきた。これらの基本粒子を「素粒子」という。ギリシア時代にレウキッポスらが物質構造の粒子説を唱えたものが，今日では，素粒子までたどりついたということができる。

これらの素粒子があつまって原子核，原子から物質までを作りあげていくときに，素粒子を結合するための力が問題である。これらの力についていままでに述べたことをまとめてみよう。

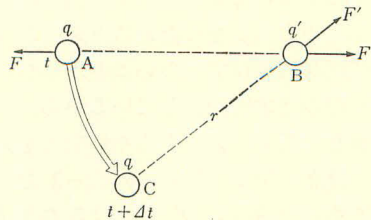
まずこれらの素粒子は，それぞれ質量を持ち，あるものは電荷を持っている。質量に関係して二つの素粒子の間には〈2-4 式〉のような万有引力が働いている。電荷に関係して，電荷をもつ二つの素粒子の間には〈2-3 式〉の電気力が働いている。この電気力が原子を構成している力である。原子核の中では，陽子や中性子の間に短距離でだけ働く強い核力が働いている。さらに，原子核を構成しているこの「強い核力」のほかに，原子核が電子を出して崩壊するときに中性子が陽子に変化する，あるいはその逆の変化をするときに働く「弱い相互作用」がある。原子核が電子や陽電子を出して崩壊するというのは放射性同位元素で起っていることであり，これを「β-崩壊」というが，弱い相互作用は，この

β-崩壊を起すものなのである。

このように，素粒子の間の相互作用には，万有引力，電気力，強い核力，弱い相互作用の4種類が働いていて，これ以外にはない。私たちの身のまわりにはいろいろな力の現象が見られるが，物質がすべて素粒子のあつまりであるからには，それらの現象はすべてこの4種類の力がもとになって組み合わさったものなのである。

力と空間　さて，素粒子と素粒子の間に働く力には，ここに述べた4種類があるとしても，素粒子という粒と粒の間の空間はこれらの力と無関係ではない。といっても，これだけでは何のことかよくわからないであろう。しかし次のような考察は，これを理解する助けになる。

二つの電荷の間のクーロン力の働き方を〔2-10図〕に示しておいた。この図を見ると二つの電荷の間の空間は力とは無関係のように見えるが，実はそうではない。〔2-20図〕で，時刻 t に電荷 q は A 点にあり，q' は B 点にあったとする。これらの電荷の間に働いている力 F は二つの電荷を結ぶ直線上にあり，q が q' からうける力と，q' が q からうける力は同じ大きさで方向が反対になっている。そしてその大きさが〈2-3式〉のクーロンの法則であらわされるわけである。

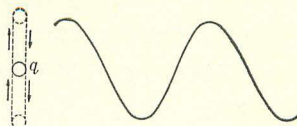
さて q の位置が動いて時刻 $t+\Delta t$ に C 点に移ったとする。このときに q' がうける力の方向は B 点と C 点を結ぶ直線上の F' になるはずであるが，いったい F' となる時刻は $t+\Delta t$ とまったく一致するであろうか。力の大きさをきめる〈2-3式〉では，力

2-20図
qが急に動くとq'がうける力はどうなるか

の方向はいつでも二つの電荷を結ぶ方向であると了解しているから，この了解のもとでは，電荷qがC点に移ればその瞬間にq'からうける力はF'になるはずである。しかし，これでは困ることがある。

いろいろの物理現象を見ていると，次のような重大な事実があることにわれわれは気づく。つまり「2点間に通信しようとすると，どんな方法を使っても光の速さより速く通信することはできない」ということである。これは物理学の相対性原理の要求することでもある。しかし，われわれが現実として重大に考えねばならないことは，われわれはこれの例外となることはまったく知らないということである。

〔2-20図〕で電荷がC点に移った瞬間にq'のうける力がF'となるとすれば，2点間の通信が光の速さより速くできることになり，相対性原理の要求に反する。われわれは相対性原理に反するような例をいまだひとつも知らないので，これは困るわけである。そこで相対性原理と相容れるようにするためには，qがCに移った瞬間よりおくれてq'がうける力がF'となることが必要である。どれだけおくれるとよいかというと，AとBの間の距離をrmとし，光の速さをcとすればr/c秒だけおくれるはずである。つまり，電荷が移動したということは，光の速さでq'につたわっていくことになる。何ものかがつたわっていくわけで，これは「空間」をつたわると考えるべきである。このことから力と空間が無関係ではないことがわかる。一方，この事実は，相対性原理の要求に関係しているから，一般的なことであり，電気力ばかりでなく，万有引力や核力にもあてはまる。

電波　さて，電気力を〈2-3式〉で書くときには，電荷がC点に移った瞬間にq'がうける力はF'となると了解しているから，〈2-3式〉のクーロンの法則は相対性原理にあわないことになる。つまり，〈2-3式〉はどんな場合でも正しいとはいえないことに

なる。正しくは電荷の移動の速さがゆっくりの場合にクーロンの法則が成り立つとすべきであるが，その目安としては，q の移動の事実が q' までつたわる時間 r/c が Δt にくらべて非常に小さいとき成り立つと考えてよい。

2-21図　電荷が振動すると電波が出る

r/c が Δt より大きいときはクーロンの法則は成り立たない。しかも〔2-21図〕のように電荷が振動しているときには，その周期に相当する何か波のようなものが出ていきそうに思える。事実，電荷がはげしく振動すると，電波が出ていく。これがラジオやテレビに使われている電波である。

電波が存在する範囲では，もう〈2-3式〉のクーロンの法則は成立しない。その代りにマックスウェルの方程式が登場してくる。この方程式についてはここでは述べないが，電波の性質をちゃんと説明できるものであり，相対性原理とも矛盾していない。歴史的にみると，マックスウェルの方程式は相対性原理より前に生まれていて，むしろ相対性原理の誕生を導いたものといえるのである。

〔2-20図〕や〔2-21図〕の説明は，電気力の本質と空間の役目について述べたものであるが，同時に，電波が存在してもよいことを納得する手段でもある。電波はより正確な言葉でいうと電磁波という。電磁波は空間の「ひずみ」がつたわっていくようなもので，この「ひずみ」もエネルギーを持っている。原子力やエネルギーの問題を理解するときに，電磁波のもつエネルギーが大切な役目をしていることがあとでわかる。

光量子　電磁波はその周波数によって性質がひどく違っている。ふつうのラジオに使われているものは1秒間に100万回くらい振動するものである。1秒間に100万回振動するものを 1 MHz

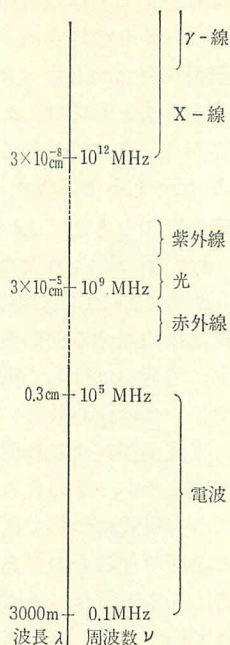
(1メガヘルツ）という。電磁波は空中を光の速さ，つまり1秒間に 3×10^8 m の割合で伝わるので，1MHz の電波の波長は 300 m になる。これよりも波長の長いのもあり，短いのもある。電波とよばれているものの中には波長が数ミリメートルのものもある。さらに波長が短くなると電磁波は光とよばれる範囲になり，さらに短くなると X-線または γ-線とよばれるものになる。これらの電磁波の波長と周波数を〔2-22図〕に示した。

2-22図　電磁波の種類

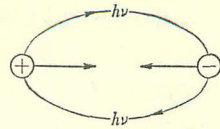
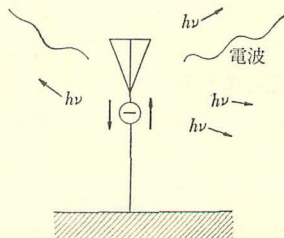
電磁波は波であると同時に，粒子としての性質も合せて持っている。こんなことをいうと変なことをいうと思われるであろうが，電磁波は電波であっても光であっても，もののすきまを通るときは波の性質をあらわすが，一つの原子に働きかけるときには粒子としての働きをすることは，われわれ物理学者にとって経験的事実なのである。ここではとりあえず，この物理学者の経験を信用しておいてもらいたいと思う。

さてこの粒子のもつエネルギーは，

$$h\nu \begin{cases} h = 6.6\times10^{-34}\ \text{ジュール・秒……プランクの常数} \\ \nu,\ \text{Hz ………………………………… 周数波} \end{cases}$$

で与えられる。電磁波のこのエネルギー粒子を「光量子」とよんでいる。電磁波を空間の「ひずみ」とするならば，光量子は「ひずみ」のつぶつぶをあらわしているともいうことができる。ラジオやテレビ放送の場合に，放送局のアンテナから電波が出て受信機まで伝わってくるときに，光量子 $h\nu$ がくると考えてもよい。

ただしこの「粒」はひどくその数が多いために「粒」でなくて，連続的な波に見えることになる。

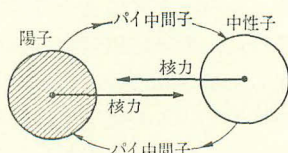
2-23図
電気力は光量子の交換によって生まれる

光量子と電気力　光量子とクーロンの法則の関係については，〔2-23図〕のような見方ができることになっている。正と負の電荷が及ぼし合っている力は，図のように光量子を「手紙」を交換するようにやりとりしているために生まれるというのである。これはマックスウェルの方程式に量子力学の考えを入れた，量子電磁気学という学問によって示されていることであるが，交換している光量子はわれわれの感覚に訴えることができないものである。そのために，〔2-23図〕の内容は経験によってたしかめることができない。

2-24図 アンテナから光量子（電波）がとび出す

しかし〔2-24図〕のように考えると，少しもっともらしくなる。図は放送局のアンテナを示したもので，この中を電子がはげしく振動すると，電波が放出される。これは多量の光量子をふりまくようなもので，電子のまわりに光量子が「糊」か「雲」のようにあったものが，電子の運動があまりにはげしいので，ふりはなされるようにちぎれてとび出すと考えてよい。このように考えると，〔2-23図〕のように，クーロンの法則の力が光量子の交換によって生まれ，電荷のまわりには光量子の「雲」があって出入りしていると考えても無理がないように思える。

電気力について，空間との関係からはじまって，電波の放出から光量子までながながと述べたのは，これらの考えは万有引力にも，核力にもあてはまるからである。ことに核力について，電気力との類推は有用であった。

パイ中間子　原子核の中で中性子や陽子の間に働いている力は，きわめて短い距離だけに働く，きわめて大きい核力であることはすでに述べた。この核力について，湯川博士が根本的な考察を行なっていて，1935年にパイ中間子の存在を予言したのであるが，そのときの考え方は次のようであった。

湯川博士は，クーロンの法則による電気力が光量子の交換によって生まれると解釈されると同じように，核力も何かの粒子の交換によって生まれると考えた〔2-25図〕。この粒子は，光量子と違って質量をもち，その質量は電子のおよそ200倍であり，地球の自転に相当する回転運動については，電子とはやや違った性質を持つものとした。これによって，核力の働く距離がきわめて短いことも，また，その力が大きいことも説明できた。この新しい粒子はあとになってパイ中間子とよばれるようになった。

2-25図
核力はパイ中間子の交換によって生まれる

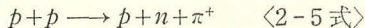
パイ中間子は，陽子や中性子がふつうのありさまでいるときには，われわれはそれを観測することができない。しかし，アンテナの中の電子がはげしく振動すると光量子をふりまくが，陽子や中性子がはげしい運動の変化を行なうと，自分の着ている着物をふりはなすように，あるいは，自分のまわりの「雲」か「糊」をちぎりとばすように，パイ中間子をふりまくことがあり得ることになる。そういう現象はわれわれの身のまわりに存在しているかもしれない。

1937年頃に米国のネダーマイヤー(S. H. Neddermeyer)とアンダーソン(C. D. Anderson, 1905—)らが，宇宙線の中に，その質量が電子の200倍くらいの粒子があることを見出し，湯川博士らは「すわこそ」と張り切ったが，質量はパイ中間子に似ていても，他の素粒子との間の相互作用，つまり力の及ぼし合いがどうもパ

イ中間子とは違うもので，解釈に長く苦しんだ。この間に，坂田昌一博士らは中間子に2種類あるのではないかという提案を行なっていたが，ついに1947年に，イギリスのパウェル（C. F. Powell, 1903―）らは宇宙線の飛跡を写真乾板にとらえて精密な観測を行なって，中間子に2種類あることを実験的にたしかめた。一方がパイ（π）中間子であり，宇宙線の中に前からその存在がわかっていたものをミュー（μ）中間子と名づけた。

さらに1949年には，米国のバークレーにあるシンクロサイクロトロンによって加速した陽子を使って人工的にパイ中間子を作ることに成功した。これでパイ中間子の存在はきわめて確実なものとなり，この年に湯川博士はノーベル賞をうけたのである。

シンクロサイクロトロンによってパイ中間子を作った反応は次のようである。

$$p+p \longrightarrow p+n+\pi^{+} \qquad \langle 2\text{-}5\,式\rangle$$

つまり，充分にエネルギーの大きい陽子（p）を，陽子にうちつけて，一つの陽子は中性子（n）に変化して，正の電荷を持ったパイ中間子（π^{+}）が生まれるわけである。この頃わかっていたことは，パイ中間子の質量は電子のおよそ300倍ということであった。パイ中間子を作った反応を見ると，中性子の質量は陽子のそれとほとんど同じであるから，右辺は左辺よりパイ中間子の質量だけ重い。つまり電子の質量の約300倍の質量を生み出さねばならない。このためには，〈1-1式〉$E=Mc^2$ によって，エネルギーが用意されなければならないが，この場合には加速された陽子の運動のエネルギーがこれに用いられていることになる。

素粒子の種類　今世紀のはじめから陽子と電子が物質構成の基本になる素粒子であると考えられていたところへ，1932年に，中性子が加わり，さらに1949年にはパイ中間子がこれに加わった。同じ頃にミュー中間子も発見された。素粒子の発見はそのあとも続いているが，ここまでのものを〔2-3表〕にまとめて整理

しておこう。

まず電子から説明をはじめると，電子には負の電荷をもつふつうの電子と，正の電荷をもつ陽電子とがある。これらのもつ電荷は正と負と違うだけで，大きさはまったく同じである。質量の絶対値は〔2-2表〕に示したが，〔2-3表〕にはこれを $E=Mc^2$ の関係によってエネルギーに換算したものが書いてある。その単位 MeV は電子を100万ボルトの電圧を使って加速したときのエネルギーである（第3章§4参照）。電子と陽電子の質量をこの MeV で測ると，0.51である。スピンとは地球の自転のように電子が自転しているはげしさ，つまり物理学の言葉では角運動量を示すもので，$h/2\pi$（hはプランクの常数）を単位として測ったものである。表の右端の欄は平均寿命を示していて，電子も陽電子も安定であるから，しいて書けば寿命は無限大である。ただし，陽電子と電子が出合うと一気に消滅して，γ-線に化けてしまう性質を持っている。このような電子と陽電子の一対を互いに反粒子であるという。

素粒子		電荷 (1.6×10⁻¹⁹ クーロン)	質量 (エネルギー換算 MeV)	スピン ($\frac{h}{2\pi}$ で測る)	平均寿命 (秒)
陽子	p	+1	938.3	1/2	安定
反陽子	$\bar{p}$	−1	938.3	1/2	安定
中性子	n	0	939.6	1/2	1.0×10^{3}
反中性子	$\bar{n}$	0	939.6	1/2	1.0×10^{3}
パイ中間子	π^+	+1	139.6	0	2.6×10^{-8}
	π^0	0	135.0	0	0.89×10^{-16}
	π^-	−1	139.6	0	2.6×10^{-8}
電子	e^-	−1	0.51	1/2	安定
陽電子	e^+	+1	0.51	1/2	安定
ミュー中間子	μ^-	−1	105.7	1/2	2.2×10^{-6}
	μ^+	+1	105.7	1/2	2.2×10^{-6}

2-3表　素粒子の一部

陽子の反粒子として反陽子がある。電荷は一方が正，一方が負であり，質量は同じで，表ではMeVであらわしてある。陽子も反陽子も寿命としては安定である。

中性子にも反中性子がある。中性子の質量は陽子より少し重いために不安定であって，次のような崩壊をして，その寿命は10^3秒である。

$$n \longrightarrow p + e^- + \nu \qquad \langle 2-6\text{式} \rangle$$

このνは表には示してないが，電荷も質量も持たない素粒子であって，中性微子とよんでいる。

陽子と中性子は原子核の中の粒子であることからまとめて「核子」とよんでいる。

パイ中間子には電荷が正，ゼロ，負の3種類がある。スピンはゼロであって，この点が電子や陽子とは違う。平均寿命はπ^+とπ^-は10^{-8}秒程度であり，π^0は10^{-16}秒程度で，非常に短い。

ミュー中間子の性質も表に示すごとくである。

この表を見ると明らかなように，最初に発見された陽子と電子は安定であるが，次に発見された中性子は不安定でその寿命は10^3秒であり，もっとも寿命の短いものはさらにおくれて発見されている。より寿命の短い素粒子の発見はさらに続いているのであって，〔2-3表〕以外にもたくさんあり，約20種に達する。さらに寿命が極端に短くて，レゾナンスとよばれる粒子を加えると，素粒子の種類は100に達する。

素粒子の数がこんなに多くなってくるといろいろのことが起る。理論物理学者のある人は，「実験物理学者はこんなに新しい動物を次々とつれてきて始末に困る」と言ったという。しかし，野原にこれだけの動物がいるのだから，理論物理学者が困ってもどうにもならないことである。

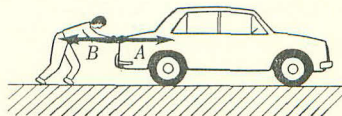
もうひとつは，素粒子の数がこんなに多くなっては，これらのどれもが基本的な粒子なのかという疑問が出るのは当然である。

この事情は，19 世紀の終りに，100 に近い元素がならんでいたのに似ている。元素の性質について周期表が作られ，20 世紀になってから，原子が素粒子から作られていることがわかってきたわけだが，こんどは素粒子そのものがさらに何かの基本的な粒子からできているのではなかろうかという疑問がわくのは当然であろう。実際にそのようなモデルは提供されている。しかし，まだ実験によって確められていない。素粒子を構成する基本粒子であるから「素素粒子」とでもいうべきであろうが，これが実験によって確められるときがくれば，それは物理学の大事件になるであろう。

第3章　力とエネルギー

原子力に関する問題を理解するためには，仕事，エネルギー，熱などについて理解を持つ必要がある。そのためには「力」とはどんなものかということについても知識が必要である。この章ではこれについての理解を深めることにしたい。そのときに，第2章で得た物質構造についての知識を利用していく。

§1　自動車，電車，船など

作用反作用　交通機関は力とエネルギーを力学として考察するときの適当な例題になっている。まず自動車を例にとろう。〔3-1図〕のように，水平な地面に自動車があるとき，ブレーキをはずして人が手で押せば，エンジンをかけなくても自動車は動く。これは，物体が力をうけると，止っているものが動き出したり，運動のありさまが変ったりするという法則のあらわれである。自動車は人の手から力 A をうけている。自動車はこのほかに地球から重力をうけているし，タイヤと地面が接しているところで地面から上に向って力をうけている。しかしタイヤが地面から上に向ってうけている力と重力はつり合って消し合っているので，ここでは考えなくてよい。自動車は手からの力だけの影響をうけて動き出すわけである。そして手で力を加えることを続ければ，車はだんだん速くなっていくことをわれわれは知っている。

A：人が自動車を押す力
B：人が自動車から押される力

3-1図
自動車が人に押されて動きだす

このときに手は車から逆向き

の力 B をうけている。車を押すときに，「のれんに腕押し」のような感じでないのは，車から力で押しかえされているからである。手が車を押す力と，車が手を押しかえす力は，ものとものとが接しているところで，両方が及ぼし合うものである。これは作用反作用の法則といって，A と B は同じ大きさで方向が反対であるという法則である。ものとものとがさわっているところには，いつもこのようなことが起っているが，これは第2章§5で述べた原子と原子の間の力によって引き起されているものであることをあとで述べよう。

A：タイヤが土から力をうける
B：土はタイヤから力をうける

3-2図
車をエンジンにつなぐと動きだす

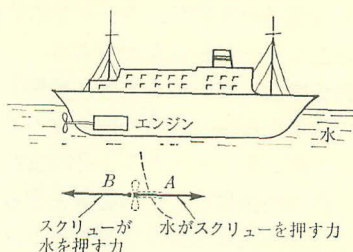
自動車は車輪をエンジンにつなぐと，人に押されなくても動き出す。車はどこかで前に向う力をうけているに相違ない。この力はタイヤと地面がさわっているところにある。タイヤが前にまわろうとするために，地面を後方に押し，その反作用としてタイヤが前方に力をうけるのである〔3-2図〕。

車のブレーキをかけるとタイヤはまわらないので，手で押しても動かない。これはまわらない車を前に押すので，〔3-3図〕のようにタイヤは地面から後方に向う摩擦力 A' を受け，手が押す力 A と消し合ってしまうので，車は動かないことになる。

エンジンのアクセルをふんで，タイヤを速くまわそう，まわそうとすれば，地面からの摩擦力は〔3-2図〕のように前に向うので車は速くなるが，逆にブレーキをかけて車がまわりに

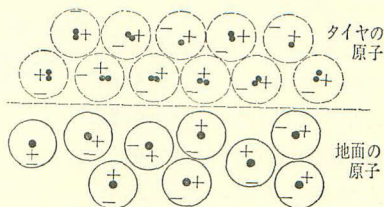
3-3図
ブレーキがかかっていると手で押しても動かない

くいようにすると地面からの摩擦力は〔3－3図〕のように後方に向うので，車の速さを小さくする働きをする。

電車はレールの上を走るが，車輪とレールとの間の力の及ぼし合いや，速くなるときの摩擦力の方向，またブレーキをかけたときの様子は自動車と同じである。

3-4図　船の場合

船の場合には地面もレールもない。しかしスクリューをまわすと，スクリューの羽根の構造のために水を後方に押す。その反作用でスクリューは前方に向う力を水からうけて船は前進することになる〔3－4図〕。ここで自動車や船などについて述べた力は，すべて物質と物質が接触しているところにあらわれている。船のスクリューと水の場合でも同じである。

さて，〔3－5図〕は自動車のタイヤが地面にふれているときの原子のようすを描いたものである。タイヤの方では原子と原子が結びついてタイヤという物質をつくっている。原子と原子が結びつく力は電気力である。地面の中の原子同士も電気力で結びついている。そこで，タイヤと地面が接触しているところであらわれる摩擦力も，タイヤの原子と地面の原子が力を及ぼし合ってあらわれるに相違ない。ここに電気力でもない，万有引力でもない，別種の力があらわれるはずはない。

タイヤが地面に及ぼし地面がタイヤに及ぼす力は，原子と原子の間に働く力が出発点になっている。つまり原子の中に無数にある陽

3-5図　タイヤと地面の間に働く力

子や電子の電荷が，クーロンの法則に従って及ぼし合う力の結果としてあらわれるものである。クーロンの法則に作用反作用の法則が成立していたことが，接触している物体の間に働く力について作用反作用の法則が成り立つことになる出発点になっている。

このように考えると，身のまわりの力学現象で起っている作用反作用の法則は，実は物質を作っている陽子や電子などの間に働く力に作用反作用の法則が成り立っていることのあらわれにすぎないことになる。

§2　力と仕事

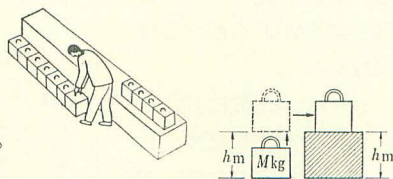
仕事　自動車にしても船にしても，それを動かすには，エネルギーが必要であるとされる。エネルギーとは何であろうか。それをどのようにあらわしたら便利であろうか。

エネルギーをはっきりと測るために，物理学では「仕事」という概念を使う。この「仕事」はふつうの生活の中の仕事とは違う概念であるが，あとで述べるように共通な部分もある。仕事は自動車の場合でも，船の場合でも，これらの物体に加えられた力 F と，物体が動いた距離 l をかけたものとする。つまり仕事 W は，

仕事＝(物体に加えられた力)×(物体が動いた距離)　〈3－1式〉

$$W = F \times l$$

と定義するのである。

仕事は〔3－6図〕のような場合を考えると，ふつうの生活での仕事につながる。一列にならんだおもりを，人が高さ h m の台の上につぎつぎと運びあげるとす

3-6図　おもりを台に運びあげる仕事

る。おもりの質量をMkgとすれば，Mkgに相当する重力と同じ大きさで上向きの力を加えないと上に持ちあげることができない。つまり，手は一つのおもりに対して$M\,\text{kg}\times h\,\text{m}=Mh\,\text{kg}\cdot\text{m}$の仕事をすることになる。$M$kgのおもりに働く力を$M$kgの力といえば，わかりやすいであろう。しかし力学では，電気力や万有引力について述べたときのようにニュートンという単位を使う。Mkgのものに働く重力は$M\times 9.8$ニュートンである。〔3-6図〕で人が一つのおもりを持ちあげるためにする仕事は，したがって，

$$W=M\times 9.8\times h \quad (\text{ニュートン}\cdot\text{m})$$

となる。

また物理学では仕事の単位に「ジュール」というものを使っているが，1ジュールは1ニュートンの力を働かせながら1メートルだけ動かしたときの仕事である。〔3-6図〕の人は一つのおもりをあげると，

$$W=M\times 9.8\times h\ (\text{ジュール})$$

の仕事をしたことになる。

仕事率　さらに物理学では，1秒間にする仕事の割合を定義する。それを仕事率といってPであらわす。つまり1秒間に1ジュールの割合で仕事をするときに仕事率を「1ワット」という。〔3-6図〕の人が1秒間に1個の割合でおもりをあげたとすれば$P=M\times 9.8\times h$ワットで仕事をしていることになり，1秒間に2個ならば$P=2\times M\times 9.8\times h$ワットで仕事をしていることになる。ここで使っている仕事率の単位ワットは電熱器，電球，発電機などで使っているワットと同じものである。

自動車や船の場合でも，地面や水からうける全体の力がFニュートンであり，t秒間に移動する距離がlmならば，このときの仕事率をPとすれば，

$$P=F\times(l/t)\ (\text{ワット}) \qquad \langle 3\text{-}2\text{式}\rangle$$

となる。l/t は自動車や船のスピードであるから，スピードが大きくて動かすために大きい力が必要なときには，必要な仕事率は大きい。

これらの仕事率を出すもの，つまりおもりを持ち上げる人の働きに相当するものは，自動車や船ではエンジンである。エンジンがどれだけの仕事率を出せるかということをワット，キロワット，あるいは馬力であらわしている。キロワットはもちろん1000ワットのことであるが，馬力には「仏馬力」と「英馬力」とがあり，仏馬力は ps と書いて，1 ps＝735.5 ワット，英馬力は HP または HP と書き，1 HP=746 ワットである。要するに馬力はおよそ740 ワットで，1頭の馬が仕事をするときの仕事率である。

仮りに人が1秒間に 10 kg のおもりを1個ずつ高さ 0.5 m だけもちあげるときには，〈3-2 式〉から 10(kg)×9.8×0.5(m)＝49(ワット) であるから，およそ 1/15 馬力である。だいたい1/10馬力がふつう人が連続的に仕事をするときの仕事率の上限とされている。

自動車のエンジンなどでは仕事率を馬力であらわし，電気のモーターや発電機ではキロワットであらわすのがふつうである。馬力やキロワットは，エネルギーを出し入れする時間的割合を示しているわけである。

§3　力と運動

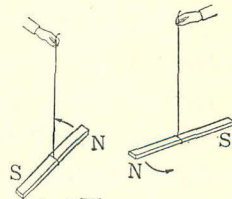
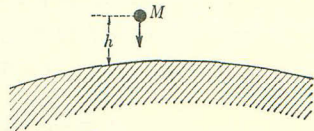
離れたものの間に働く力　ここで，ものに働く力とその運動の変化について，もっと立ち入って考え，一般的な法則について述べよう。

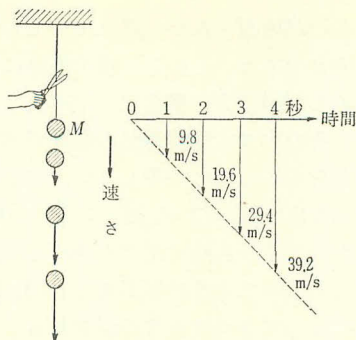
自動車はいくつものタイヤで地面にふれていて，そのどれにも力が働いている。船はスクリュー以外の部分でも水と接触していて，ここにも力が働いている。つまり，いろいろの力が働いていて考え方が複雑である。もっとも簡単に考えることができるのは，

ものが地面や水から離れていても働いている力，すなわち重力の場合である。しかし，重力の話に入る前に，ものがさわっていなくても働く力の例を二つ述べよう。

その一つは摩擦電気の実験である。摩擦によって同じ種類の電荷を持ったものは押し合い，違う電荷を持ったものは引き合う。この事実は，〔3-5図〕でものが接触した場合に働く力は原子の中の素粒子が持つ電荷が及ぼし合う力の総和であると述べたことにくらべてみる必要がある。〔3-5図〕の場合，きわめて近距離になって，つまりものがさわってから力が働くのは，原子一つとしてはその中の電荷が打ち消し合って中性になっているからである。〔2-9図〕の摩擦電気の実験では，原子の中の一部の電荷が他のものに移って原子が中性でなくなっている。この場合には電荷の力は〈2-3式〉のクーロンの法則にしたがって遠方に及ぶ。

ものが離れていても力が働く例で，人の目によくふれるものは磁石である。〔3-7図〕のように同じ種類の磁極は押し合い，違う種類の磁極は引き合う。

さて重力であるが，〔3-8図〕で空中にある物体 M は，地球の各部分との間に〈2-4式〉であらわされる万有引力を及ぼし合う。地球の各部分というのは，東京の土地や水，アメリカの土地，水，岩，ブラジルの土地等々のもの一切である。これらとの間の万有引力を加え合わせると，地球の質量の全部が地球の中心に集中しておるとしたとき M に働く力と同じになることを証明することができる。これが M がうける重力である。

3-7図
磁石の極は押し合ったり引き合ったりする

3-8図
物体と地球との間に働く万有引力

M がうける重力は地面からの高さ h によって変化するであろうか。M のうける万有引力は地球の質量が地球の中心に集中したときと同じであるから，M と地球の中心との距離が問題となる。地球の半径は約 6400 km$=6.4\times10^6$ m であるから，たとえば $h=10^3$ m としても M から地球の中心への距離は 1/6400 違うだけであるから，万有引力はほとんど変らない。このために地表の近くにあるものがうける重力はほとんど一定と考えてよい。

3-9図　落下運動

加速度と運動の方程式　それでは空中を自由に落下するものの運動はどうであろうか。〔3-9図〕のように質量 M kg の物体を糸で吊しておき，糸を切れば自由に落下する。ほんとうは空気があって，その抵抗があるので完全に自由な落下とはいえない。しかし石や鉛のようなものがあまり高くないところから落下するときには，自由な落下と考えてよい。羽や紙切れのようなものの落下ではそういかなくて，空気の抵抗が問題になるけれども。

まず0秒に糸を切ったとすれば，その瞬間には落下速度はゼロであるが，重力によって動き出した物体の速さはだんだんと大きくなっていく。あるものが1秒間に v m 動くときの速さは v m/sec と書くが，物体が落下するときのように速さが一定でなく刻刻と変化していく場合には，ある時刻の前後の短い時間 Δt 秒の間に Δs m 移動すれば，その瞬間の速さ v は，

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}\ \text{m/sec} \qquad \langle 3\text{-}3\,\text{式}\rangle$$

と書くことができる。

さて実験結果によると，糸が切れた瞬間にはゼロであった速さは，1秒間たてば9.8 m/secになり，2秒後には2×9.8 m/secと時間に比例して大きくなる。これを〔3-9図〕で，横に時間の経過を示し，時間ごとの速さを矢印で書いてある。矢印の長さは速さに比例している。つまり，落下をはじめてからt秒経過したあとでは，

$$v = 9.8t \ \text{m/sec}$$

となっているわけである。

さて地上でM kgの物体がうける重力Fは，Mと地球との間に働く万有引力の結果であるからMに比例する。力をニュートンという単位で測れば$F=M\times 9.8$ニュートンである。これらのことから物体がうける力Fと物体の運動の変化との間の関係を知ることができる。つまり，

$$F = M\times 9.8 = M\times\frac{v}{t}$$

となり，ここにv/tは，1秒間に速さが変化する割合で，これを「加速度」という。加速度をaであらわすと，

$$F = Ma \qquad \langle 3\text{-}4\text{式}\rangle$$

となる。これは物体に力Fが加わると，速度の変化，つまり加速度aを起し，質量Mと加速度を乗じたものが力Fになるというのである。この関係は重力による自由落下の場合についてのものであるが，このほかのどんな運動の場合でも成立する。力がいくつか働いていてもそれらを加え合せた合力をFとすればやはり〈3-4式〉が成り立つ。また速度が時間に比例しないときにも小さい時間Δtの間の速度変化Δvを考え，$a=\Delta v/\Delta t$によって一般の場合の加速度を定義する。これによれば運動の方程式は

$$F = Ma = M\frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \langle 3\text{-}5\text{式}\rangle$$

となる。

〈3-4式〉は力学における基本法則の一つであって，運動の方程式，またはニュートンの運動の第2法則とよばれるものである。この法則は力と加速度の間の関係を示すばかりでなく，$F=0$，つまり外から力が働かないか，あるいはたくさんの力が働いていてもそれらを加え合せたものが消し合ってゼロになっているときには，加速度は存在しない。つまり，速さの変化はなく，止っているものはそのまま止っており，動いているものは同じ向きに同じ速さで動きつづけることを示している。この運動の方程式は自動車や電車や船，天体や地球など，一切の運動にあてはまる。

重力の加速度　われわれは物体の自由落下の場合から一般の運動の方程式に入っていったが，逆に，運動の方程式から落下運動を眺めてみよう。M kg の物体がうける重力は $M\times9.8$ ニュートンであるから，運動の方程式は，

$$M\times9.8=Ma,\qquad a=9.8$$

となり，加速度は質量に関係しないことになる。この $a=9.8$ は重力による加速度を示すもので，ふつう g であらわしている。

重力による加速度は質量によらない。重いものでも軽いものでも同じように落ちる。むかしは，つまりガリレイやニュートンより前は，重力による落下では同じ高さなら重いものは軽いものより速く落下すると考えられていた。ガリレイはこれに疑問をはさみ，ピサの斜塔から重い石と軽い石を落してそれらが同時に地上に到着することをたしかめたと伝えられている。1600年代のはじめのことである。

こんなことが17世紀に入るまで人類にとってはっきりしなかったのはおかしいくらいである。重い石と軽い石を屋根の高さくらいから落してみればおよそのことはすぐにわかるのに，人類もなさけないものだともいえる。このことは，実際にやってみる，実験してみるということがどんなに尊いことかということを教えてくれる。

落下距離　自由落下では，物体の速さは落下時間に比例して大きくなっていく。では落下距離はどうであろうか。速さが一定ならば落下距離は時間に比例するので簡単であるが，自由落下では速さが刻々と変化するので，ある1秒間はその間の平均の速さで落下すると考えるとよい。つまり，

〔時　間〕	0―1	1―2	2―3	3―4 sec	
〔平均の速さ〕	$\frac{9.8}{2}$	$\frac{9.8+19.6}{2}$	$\frac{19.6+29.4}{2}$	$\frac{29.4+39.2}{2}$	m/sec

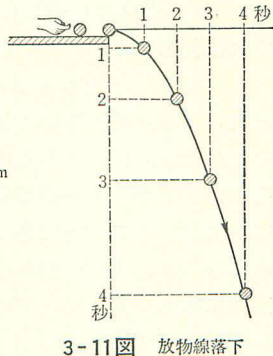
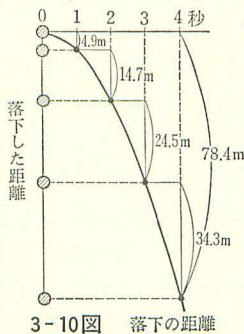
のように，おのおのの1秒間の落下距離を計算すると〔3－10図〕のようになる。この4秒間の落下距離を加えると78.4 m となって，これはちょうど落下距離を s m，落下時間を t 秒すれば，

$$s=\frac{1}{2}gt^2 \quad (g=9.8) \qquad \langle 3\text{-}6\text{式}\rangle$$

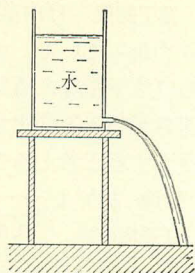
によって計算したものになっている〔3－10図〕。

放物線落下　物体を〔3－11図〕のように板の上から指ではじけば，まっすぐ下には落ちない。このとき物体ははじめから水平方向の速さを持っているのである。この速さは変化しないでそのままますすむ。なぜなら，重力は垂直方向にだけ働いて，水平方向には働かないからである。一方，垂直方向に働く重力のために下に向う速さは，時間に比例して大きくなり，それによる落下距離は〈3－6式〉で与えられる。その結果として，物体は〔3－11図〕のような曲線を描いて落ちる。この曲線を放物線，このような落下を放物線落下という。〔3－

3－10図　落下の距離

3－11図　放物線落下

12図〕のように水桶の側壁の穴から水平に吹き出す水も放物線落下の一例である。

3-12図
桶の水の放物線落下

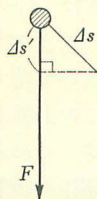
野球のボールをバットで打ち上げたときには，はじめ上に向う速さが大きかったものが重力によってどんどん小さくなり，ついにゼロになってから速さは下に向う。この間，水平方向の速さは変化しない。つまり落下をはじめてからの運動は〔3-11図〕の放物線落下になっている。ボールが上に向うときも放物線になっている。実際には空気の抵抗があるために，野球のボールのような場合には，放物線からかなりはずれたものになっているのだが。

§4　運動のエネルギーと位置のエネルギー

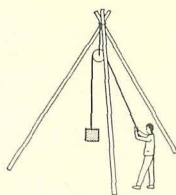
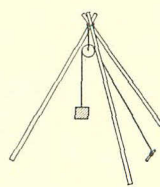
仕事の定義　「原子力」の問題は，核反応の「エネルギー」を利用する問題であることは繰り返し述べた。このエネルギーについての了解をもう一歩すすめる段階にきている。

〔3-13図〕のように物体に力 F が働いているとする。この物体の移動は一般には力 F の方向に向っているとは限らない。そこで Δs の方向に移動したとして，Δs の F 方向の成分を $\Delta s'$ とすれば仕事は，

$$仕事 = \Delta W = F \times \Delta s' \qquad 〈3\text{-}7式〉$$

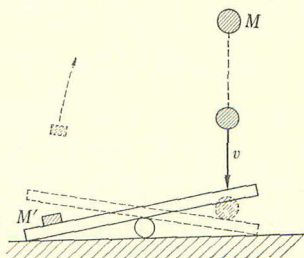
によって与えられるのである。

これによれば，たとえば人がおもりを持ち上げて，そのあと水平に動かして台の上にのせるというときに，力は上下の方向であるから，持ち上げるときは仕事になるが，水平に動かすときは，動いた距離は力の方向に垂直であって，力の方向への成分はゼロであるから仕事はゼロである。しかし私たちはおもりを支え

3-13図

て水平に動かしていても，疲れる。動かさないでつり上げたまま止っていても疲れて，仕事をしたと同じ感じになる。これは人の体が変形できるようにできているものを，ある形に支えるために筋肉を緊張させる必要があり，それが疲れの原因になるのである。〔3-14図〕で，人が滑車を使っておもりをつりあげ，おもりを空中に止めておくためにひもを引っ張っていれば疲れる。しかし〔3-15図〕のようにひもを杭に結びつけてしまえば，人は何もしなくてよい。おもりが止っているときには仕事をしなくてよいのは〔3-15図〕に相当するわけである。

3-14図
おもりのひもを引っ張って支える

3-15図
おもりのひもを結びつけて支える

運動のエネルギー　さて，運動しているものは仕事をすることができる。〔3-16図〕を見ていただこう。シーソーの片方におもり M を落せば反対側のおもり M' はとび上る。すなわち M' を高いところに持ちあげることができるのであるから，運動している物体は仕事をすることができることになる。その分量を求めるのに次のように考える。

〔3-17図〕のように速さ v m/sec で動いている質量 Mkg の物体を止めるため，一定の力 F を加えたとする。速さ v の変化と F の関係は運動の方程式〈3-4式〉で与えられる。Δt の間の速さの変化を Δv とすれば，

3-16図
運動している物体は仕事をすることができる

3-17図

$$F = M\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

となり，仕事を求めるために両辺に動いた距離 Δs をかければ，

$$F\cdot\Delta s = M\frac{\Delta v}{\Delta t}\cdot\Delta s = M\frac{\Delta s}{\Delta t}\Delta v = Mv\Delta v$$

となる。ここで $K=\frac{1}{2}Mv^2$ を考え，v が Δv だけ減少したときを K' とすれば，

$$\Delta K = K-K' = \frac{1}{2}M\{v^2-(v-\Delta v)^2\} = Mv\Delta v\left\{1-\frac{1}{2}\frac{\Delta v}{v}\right\}$$

となる。第2項の $\frac{1}{2}\frac{\Delta v}{v}$ は Δv が v にくらべて小さいために無視できるから，

$$\Delta K = \Delta\left(\frac{1}{2}Mv^2\right) = Mv\Delta v$$

となり，結局，

$$F\cdot\Delta s = \Delta\left(\frac{1}{2}Mv^2\right)$$

となって，仕事は $\frac{1}{2}Mv^2$ の変化となる。その結果として，M が止るまでの仕事の全量は $\frac{1}{2}Mv^2$ となる。これは運動しているためのエネルギーといってよいものであって，

$$K = \frac{1}{2}Mv^2 \quad \text{(ジュール)} \qquad \langle 3-8\text{ 式}\rangle$$

を「運動のエネルギー」という。運動のエネルギーはどんな物体でも，また，どの方向に運動していても〈3-8式〉で与えられる。分子の運動のエネルギーについてはすでに第2章§3で気体の圧力と温度の項で言及している。しかし運動のエネルギーが〈3-8式〉で与えられるのは，速さがあまり大きくないときのことであることはのちに§6で述べる。

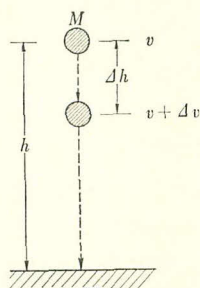
位置のエネルギー　高いところにある物体は静止していても仕事

をする能力を持っている。〔3-18図〕のように地面からの高さ hm のところにある Mkg の物体Aは，ひもと摩擦のない滑車によって，他の Mkg の物体Bを高さ hm だけ持ち上げることができる。このときには，Bを持ち上げる力は Mg ニュートンであるから，Aがした仕事 V は，

$$V = Mgh \text{（ジュール）} \quad \langle 3\text{-}9 \text{ 式} \rangle$$

である。この V を高さ h にある物体の「位置のエネルギー」という。この位置のエネルギーは，距離 h の間では力が一定のときについて述べたが，これが一定でなくて変化する場合でも，仕事の総和を考えればよいわけで，これについてはあとで地球から遠いところでの仕事を考えるときに述べる。

3-18図
高いところにある物体は仕事をすることができる

自由落下の場合　物体の運動のエネルギーと位置のエネルギーについて述べたが，自由落下のときには，これらの二つの間に簡単な関係がある。物体が〔3-19図〕のように落下すると，位置のエネルギーは減少していき，運動のエネルギーは増していく，Δh だけ落ちると位置のエネルギーの変化は，

3-19図
自由落下の位置のエネルギーと運動のエネルギー

$$\Delta V = -Mg\Delta h$$

である。一方，運動のエネルギーについては，〈3-8式〉を導いたやり方を使って，

$$\Delta K = \Delta\left(\frac{1}{2}Mv^2\right) = Mv\Delta v = M\frac{\Delta h}{\Delta t}\Delta v = M\frac{\Delta v}{\Delta t}\Delta h = Mg\Delta h$$

となるから，

$$\varDelta V+\varDelta K=-Mg\varDelta h+Mg\varDelta h=0$$

となって，V の変化と K の変化は相殺することになる。つまり次のように全エネルギー W を位置のエネルギーと運動のエネルギーの和とすると，

$$W=V+K=一定 \qquad 〈3-10 式〉$$

となり，W は自由落下のときに変化しない量であることになる。このようなことに，エネルギーという概念の便利さと大切さがあらわれている。

ここでも空気の抵抗は無視されている。空気の抵抗が無視できなければ，物体に働く力は重力だけではないからこの式は成立しない。落下するにつれて全エネルギーは減少していくことになる。

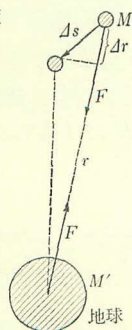
地球の遠くで　いままで述べたのは地球の表面の近くで，重力が一定と考えてよい範囲で，物体が自由落下するときのことである。物体が地球から遠くに離れても，万有引力は働く。このときの位置のエネルギーと運動のエネルギーについて考えてみよう。

運動のエネルギーが $\frac{1}{2}Mv^2$ であらわされることは，この場合でも同じである。位置のエネルギーは，場所によって万有引力が違っているから，地球の表面の場合とは事情が違ってくる。地球から r m のところに質量 M kg の物体があり，地球の質量を M' kg とすれば，二つの物体の間に働く万有引力 F は〈2-4 式〉によって，

$$F=G\frac{MM'}{r^2}$$

となる。

さて，M が〔3-20図〕のように $\varDelta s$ だけ移動すると，仕事は，$\varDelta s$ の力の方向，つまり M と M' を結ぶ直線への成分 $\varDelta r$ と F の積であって，

$$F\cdot\varDelta r=G\frac{MM'}{r^2}\varDelta r$$

3-20図
地球の遠くで

となる。

ここで次のような計算を見ると，$F \cdot \Delta r$ は $G\dfrac{MM'}{r}$ の変化に等しいことがわかる。

$$\left(-\frac{1}{r}\right)-\left(-\frac{1}{r-\Delta r}\right)=\frac{\Delta r}{r(r-\Delta r)}=\frac{\Delta r}{r^2}\left\{\frac{1}{1-\dfrac{\Delta r}{r}}\right\}$$

このときに分母の $\Delta r/r$ は1にくらべて非常に小さいことを考慮しているのである。これによると位置のエネルギーの変化 $F \cdot \Delta r$ は $V=-G\dfrac{MM'}{r}$ の変化になっている。それでこの場合の位置のエネルギーは，

$$V=-G\frac{MM'}{r} \qquad \langle 3-11\text{式}\rangle$$

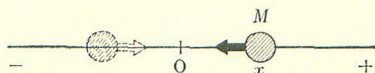
とおくことができる。位置のエネルギーは物体がどこにあるときをゼロとするかは自由である。地表での〈3－9式〉は地表面でゼロとした。地球から遠くはなれた〈3－11式〉では，逆に，ひどく遠いところ $r=\infty$ のところをゼロとしている。

地球の遠くを運動するものでも，運動のエネルギーと位置のエネルギーの総和は一定になっている。式で書けば，

$$W=\frac{1}{2}Mv^2-G\frac{MM'}{r}=\text{一定}$$

となっている。月でも人工衛星でも，みなこの関係は成立しているのである。

振動する物体　地球の遠くの話から，地表の話にもどろう。われわれの身のまわりには振動というか，往復運動を行なうものがたくさんある。時計の振り子，楽器の弦などがそれである。後に述べるように原子または原子の集団においても振動運動が大切である。

3-21図
物体が原点に向う力をうけると振動が起る

振動運動において特徴的なことは，〔3－21図〕で，質量

M の物体が原点 O にあれば力をうけないが，$+x$ にずれれば，$-x$ の方向へ，$-x$ にずれれば $+x$ の方向へ，いずれも原点 O に向う力をうけるということである。x だけずれたときに力の大きさはどうなるか。場合によって違うが，もっとも簡単な場合は，力が x に比例するときである。つまり，

$$F = -kx$$

と書ける場合である。このときの運動方程式は，

$$F = -kx = Ma = M\frac{\Delta v}{\Delta t} = M\frac{\Delta}{\Delta t}\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

となり，微分記号で書けば，

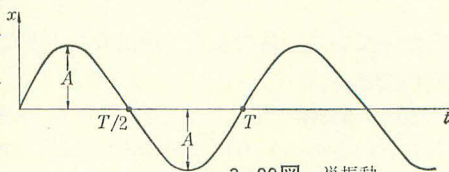
$$M\frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

となり，この解の一つは，

$$x = A\sin\sqrt{\frac{k}{M}}t$$

であることは微分算によってわかる。この解を，

$$x = A\sin\frac{2\pi}{T}t, \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}} \qquad \langle 3-12\text{式}\rangle$$

と書けば，T は周期である。これを図に書けば〔3-22図〕のようになり，A は振幅である。このような振動を単振動という。

3-22図　単振動

単振動での位置のエネルギーと運動のエネルギーについて考えてみよう。x という場所にあれば，原点に向う力をうけて原点にもどるので，重力のときと同じように仕事をすることができる。x のところで Δx だけ移動するときの仕事は $kx\Delta x$ であるが，運動のエネルギーのときに $v\Delta v$ を扱ったのと同じ数学的手法によ

って，このときの位置のエネルギー V は，

$$V=\frac{1}{2}kx^2 \qquad \langle 3\text{-}13\text{式}\rangle$$

で与えられることがわかる。この場合にも，運動のエネルギーは $K=\frac{1}{2}Mv^2$ であるから，全体のエネルギーは，

$$W=\frac{1}{2}kx^2+\frac{1}{2}Mv^2=\text{一定}$$

となっている。この関係は次のように〈3-12式〉を使ってためして見ることができる。

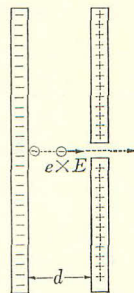
$$x=A\sin\frac{2\pi}{T}t,\quad v=\frac{dx}{dt}=A\frac{2\pi}{T}\cos\frac{2\pi}{T}t,\quad M=k\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$$

$$W=\frac{1}{2}\left\{kA^2\sin^2\frac{2\pi}{T}t+MA^2\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2\cos^2\frac{2\pi}{T}t\right\}=\frac{1}{2}kA^2=\text{一定}$$

全エネルギー W が一定というのは，振幅 A が一定のときであって，A が大きくなれば2乗に比例して W は大きくなる。この W を振動のエネルギーという。W はあとで物質の温度が，原子の振動のはげしさに関係してくるときに大切になってくる。

加速器　原子核物理学の研究のために陽子や重陽子，α-粒子などを加速してそのエネルギーを大きくするものには，コッククロフト形，バン・デ・グラーフ形，サイクロトロンなどいろいろのものがある。これらのものは真空にしたり，磁石を使ったりするが，全部に共通なことは，電界によって加速するということである。電界は〔3-23図〕のように，二つの平面電極を向い合せ，一方に負の，他方に正の電荷を持たせたときなどにその間にできるものである。たとえば図のように電極の間に電子があれば，これは，左側の負の電荷に押され，右側の正の電荷に引かれて力をうける。その力を，

3-23図
電界による加速

$$F=e\times E$$

とおいて，E を「電界の強さ」という。計算を略すが，図のようなときには E は電極の間のどこでもおよそ一定である。

電子でも陽子でもよいが，電子に例をとる。図の左の電極から電子が出たと考え，はじめの速さがゼロであったものが加速されて右の電極の穴から速さ v で外に出たとする。このときにも位置のエネルギーと運動のエネルギーの総和は一定であるから，出るときの運動のエネルギー $K=\frac{1}{2}mv^2$（m は電子の質量）は位置のエネルギーの変化に相当して $E\times e\times d$（d は電極間の距離）となっているはずである。ただし真空の中であるから，電子は空気の分子に衝突するようなことはなく，自由に運動するとする。

$$K=\frac{1}{2}mv^2=E\times e\times d$$

この式で電界に二つの電極の距離をかけた $E\times d$ は二つの電極の電位差（電圧）をあらわしている。$E\times d$ を1ボルトとし，e として電子の電荷 1.60×10^{-19} クーロンをとるときのエネルギーを特に「1電子ボルト」といい，eV であらわす。$E\times d$ が100万ボルトのときのものを100万電子ボルトといい，MeV であらわす。この MeV はすでに第2章§8で素粒子の質量をあらわすために使っている。

1ボルトの電圧は次のようにしてきめる。q が1クーロンのときに $E\times d\times q$ が1ジュールになれば $E\times d$ が1ボルトである。だから1電子ボルトのエネルギーは，$e=1.60\times10^{-19}$ クーロンであるから 1.60×10^{-19} ジュールとなる。このようなことは〔3-23図〕で電子でなく陽子を走らせても同じことである。電荷の絶対値が e と同じだからである。ただし，電極の電荷を反対にしないと加速されない。

加速器では電極間の電圧が10万ボルトとか100万ボルトにもなる。サイクロトロンでは 50 MeV，陽子シンクロトロンでは 30000 MeV というようなものもあるが，このようなものでは二

つの電極による加速をくりかえして行なうのである。このときには直流電圧は使えなくて，電波の交流電圧を使う。

§5　熱エネルギー

位置のエネルギーや運動のエネルギーは，われわれの日常生活ではあまり親しみのない概念である。ところが，熱や熱エネルギー，温度となると日常生活に深いつながりがある。あとで述べるように原子炉から出た熱は冷却材を熱し，冷却材が水を加熱して水蒸気を作るなど，原子炉でも熱は重要な問題である。実は，このような熱の現象を理解するために，位置や運動のエネルギーを理解する必要があったのである。

温度　物体の温度が高いとか低いとかいうのは，その中の原子や分子の運動のエネルギーが多いか少いかによってきまる。固体では，原子が格子構造を作っていて，おのおのの原子がその「あるべき位置」を中心としていろいろの方向に振動している。振動のときの運動のエネルギーは，前節で述べたように，振幅の2乗に比例して大きくなるが，この振動がまったくなくなったときが，絶対0度である。絶対温度を T であらわせば，分子の運動のエネルギーの平均 $\overline{K}$ は絶対温度 T に比例している。比例常数を a とすれば，

$$〔運動エネルギーの平均〕= \overline{K} = aT \qquad 〈3-14式〉$$

となる。

液体では分子は，固体と違って，格子を作っているわけではなく，流動しているが，それでも分子の運動エネルギーの平均が絶対温度に比例することには変りない。

気体では分子は，自由にとびまわっていて，ある点を中心として振動しているとはいえない。自由運動の運動のエネルギーの平均が絶対温度に比例している。むしろ気体を用いる方が，絶対温度は決めやすい。

水と氷が共存する摂氏0度は絶対温度で $T=273.2$ 度，水と水蒸気が共存する摂氏100度は $T=373.2$ 度である。摂氏を℃，絶対温度を°K で書き，100℃ は 373.2°K であるというように書く。

気体の温度とエネルギー　気体では分子がほとんど自由にとびまわっているが，その平均の運動のエネルギーは温度によって決まっていることはすでに述べた。もっとくわしくいうと，分子の質量を M，速さを v，多くの分子についてとった v^2 の平均を $\overline{v^2}$ とすると，

$$\frac{1}{2}M\overline{v^2}=\frac{3}{2}kT \qquad \langle 3-15\text{式}\rangle$$

となり，k はどんな種類の分子でも共通な常数であって，ボルツマンの定数という。k の値は，

$$k=1.38\times10^{-23} \quad (\text{ジュール}/^\circ\text{K})$$

となる。一方，気体の圧力も，分子密度が一定ならば $M\overline{v^2}$ に比例するので，気体の圧力を測り，〈3-15式〉を利用して絶対温度を知ることができる。

さて，0℃ で気体分子の平均の速さはどのくらいであろうか。水素に例をとり，水素分子の実際の質量を入れると，〈3-15式〉から，平均の速さは約 1800 m/sec となる。水素以外の分子では，その速さの平均は，同じ温度で，分子量の平方根に逆比例する。

ある温度で気体の分子の持つ平均のエネルギーを電子ボルトであらわすと，便利なことが多い。0℃ として，$T=273.2$ と k を入れ，前節で1電子ボルトをジュールであらわした数値を使うと，

$$\frac{1}{2}M\overline{v^2}=\frac{3}{2}kT=3.77\times10^{-21}\text{ジュール}=0.035\,\text{eV}\,(0^\circ\text{C},\ 273.2^\circ\text{K})$$

この式では分子の平均の運動のエネルギーを $\frac{3}{2}kT$ としているが，これを Tk として，ある温度における分子の平均の運動のエネルギーを電子ボルトであらわすことが多い。これによると，0℃ に対して，

$$\frac{1}{2}M\bar{v}^2 = kT = 0.024\,\text{eV}\ (0^\circ\text{C},\ 273^\circ\text{K}) \qquad \langle 3\text{-}16\text{式}\rangle$$

となる。

〈3-16式〉の表現を用いるときには，分子の平均の運動のエネルギーはこれの3/2倍になるわけである。

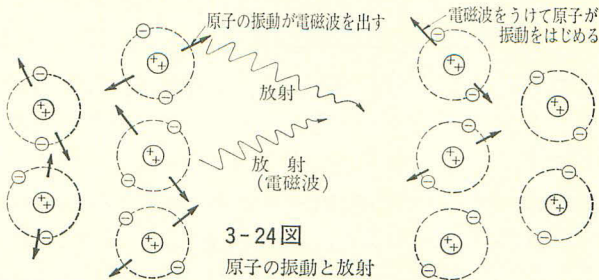
分子一つがこのようなエネルギーを持っていれば，物質全体の熱エネルギーは，これに分子の数をかけたものである。一般に固体でも液体でも気体でも，分子一つが持つ振動のエネルギーをW_0，物質の中の分子の数をN個とすれば，

$$\text{熱エネルギー} = Q = NW_0 \qquad \langle 3\text{-}17\text{式}\rangle$$

とおくことができる。こまかくいえばこのW_0の中に分子の自転に相当するエネルギーも入れる。

放射　温度に関係する感覚では，手で物体にさわって温いか冷いかということのほかに，手を日光や赤熱している物体に向けてかざすと温く感ずるということがある。この温い感じは何かが空中を伝わってきて，手を温めるからである。

このときに伝わってくるものを放射とよぶ。放射は電磁波の1種であって，赤外線とおよそ一致するものである。その波長は光より長く，ふつうの電波より短い。

太陽も，赤熱した物体も原子の集団である。この集団がどのようにして放射を出すのであろうか。〔3-24図〕にその様子を示す。

3-24図
原子の振動と放射

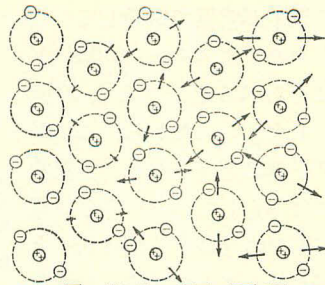
高温であるから，原子ははげしく振動している。そのために原子の中の電荷を持つ粒子もはげしく振動していて，〔2－24図〕（67ページ）で説明したように，放送局のアンテナから電波が出るのと似た事情で電磁波が原子から出ていくことになる。原子の振動にいろいろの形のものがあるために，原子から出ていく電磁波の波長にもいろいろのものがある。しかし物体が高温になれば，平均の波長は短い方に移っていく。

〔3－24図〕の右の方は放射をうける原子の集団である。電波がくるとラジオの受信アンテナに振動電流を起すのと似た事情で，放射が到着すると原子の中の電荷を持つ粒子に力が働いて，原子が振動を起し，その温度が上る。日光にかざした手が温く感じるのは手の中の原子についてこのようなことが起っているからである。

このように放射は電磁波の形でエネルギーが移動するものである。一方，第2章§8で述べたように，電磁波はその周波数をνとすると$h\nu$というエネルギー量子のあつまりと見ることができる。この両方の表現がともに真実なのである。$h\nu$は前にも述べたように「空間」のひずみとみてもよい。物質を構成しているものは素粒子であり，その間に「空間」がある。この立場からすると熱エネルギーを次の二つに区別することができる。ひとつは，物体の温度が示すものは原子の振動の運動のエネルギーである。これは原子を構成している素粒子の運動のエネルギーとみてよい。もうひとつは，素粒子の間の「空間」のひずみである。いいかえると，熱エネルギーはひとつは素粒子の運動から，もうひとつは素粒子と素粒子の間にある「空間」のひずみからきているということができる。

伝導と対流　熱いものから冷いものに熱エネルギーが伝わるのは，〔3－24図〕のように放射によるのもあるが，もっとふつうには，物体の一部が温度が高く一部が低いときに，高いところから

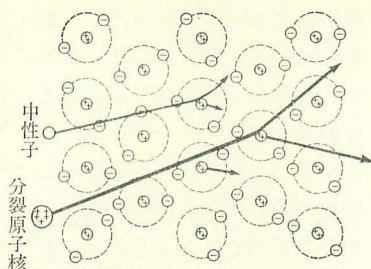
3-25図　熱伝導では原子の振動が移っていく

低いところへ熱エネルギーが伝わっていく。〔3-25図〕のように，物体の一部の原子がはげしく振動していて，一部はそれほどでないとする。一つの原子の振動が他の原子の振動を誘い出すことができるかどうかは，原子の性質と，原子の結合の様子によって異ってくる。金属のように熱の良導体といわれるものは，原子の振動が他の原子によく伝わる。絶縁体では伝わりにくい。このような性質の違いを説明するには，原子の構造と量子力学の助けを借りる必要がある。いわゆる物性物理学の問題である。

このように格子を作っている原子の振動が他の原子に移って，熱エネルギーが流れることを熱の伝導という。一方気体や液体では，分子は1ヵ所に止っていないから，熱運動のはげしい分子の集団が場所を変えて移動することがある。これによる熱エネルギーの移動を「対流」とよんでいる。

原子炉の熱　原子炉では，核反応のエネルギーを熱として利用する。核反応のときに飛び出してくる粒子と，物質の中の熱とはどのようにつながるのだろうか。

原子炉の中ではウラニウムの核分裂が起り，分裂の結果，分裂原子核と中性子ができる（〔1-4図〕26ページ）。この中で分裂原子核の大部分はウラニウムの中で止ってしまって外には出られない。中性子は物質に吸収されにくいので，ウラニウムから出て，減速材その他の中をとびまわる。

ウラニウムの核分裂のときには約200 MeVのエネルギーが出る。このうち，一つの分裂原子核に，仮りに70 MeVのエネルギーが渡されたとしよう。このエネルギーは，物質の格子点にあ

る原子が常温で振動しているときのエネルギー 0.024 eV にくらべると，なんと29億倍も大きい。だから，これが原子群にとび込むと，実際的には静止しているに等しい原子群の中をひどくはげしくとびまわることになる。おとなしい人たちの中を無法者がとびまわるようなものである。

3-26図
分裂原子核や中性子が物質の温度を上げる

この無法者は，〔3-26図〕のように原子核に衝突して蹴とばし，さらに次のものを蹴とばす。蹴とばされた原子核も他の原子核を蹴とばす。このような混乱のあとでは，原子核が振動状態になり，結果として原子が振動していることになる。こうして核反応からとび出した粒子によって物体の温度が上るのである。

中性子が物体の中を走りまわっても，割合は少ないが，物体の温度が上るのも，図のように原子核を蹴とばすことによる。

いうまでもなく，物体の温度が高いということはその中の一つや二つの原子の振動のエネルギーが大きいということではない。物体の中の無数の原子がはげしく振動してはじめて温度が高くなる。しかし，仮りに一つの粒子でも $\frac{1}{2}Mv^2=kT$ によって温度を定義するとすれば，一つの分裂原子核の温度は $273\times(7\times10^7/0.024)=8.0\times10^{11}$°K，すなわち8000億度ということになる。これだけの高温の粒子がもつ熱エネルギーが格子点の数多くの他の原子に分配されると考えることができる。

§6　物体の速さと光の速さ——相対性原理

さて，本章§3 で物体に力が働くとその速さに変化が起り，速さの変化の割合 a と力 F の間には $F=Ma$（〈3-4式〉）の関係が

あることを述べた。この式を見ると，力がいつまでも同じように働いていると，速さはどこまでも大きくなっていくようである。また，§4 で，空中を自由に運動する物体では運動のエネルギーと位置のエネルギーの総和は一定であることを述べた。それでは位置のエネルギーの変化が大きくさえあれば，運動のエネルギーはどこまでも大きくなるように思える。果してそうであろうか。

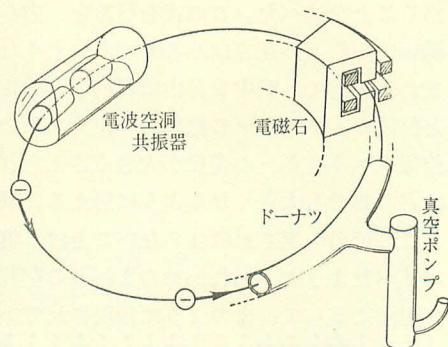
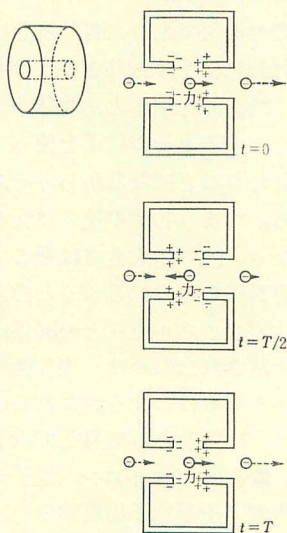
ここで思い出さねばならないことは，第2章§8 の素粒子の節で述べたように，われわれのまわりの空間も物体も，相対性原理の要求によって，次のように制限されているということである――2点間の通信は光の速さより速くすることはできない。なぜこんな制限があるのかについてはわからない。とにかく相対性原理の結果であり，自然現象はみなこの制限にしたがっていて，われわれはその例外をひとつも知らないということが事実である。

であるとすると，物体の速さが光の速さ 3×10^8 m/sec を越えたとするとその粒子を使って2点間の通信を光の速さよりも速く行なうことになるから，そんなことは有り得ないということになる。つまり物体の速さは光の速さを越えることはできないことになり，速さの大きさはそこで止ってしまう。とすると，物体の速さが光の速さに近づくと力と加速度の関係や運動のエネルギーと位置のエネルギーとの関係は書き直す必要があることになる。書き直されたものは，相対性原理とも矛盾しない力と運動の関係を与えるものになる。これらのことがらについて，電子シンクロトロンに例をとって考えてみよう。

電子シンクロトロン　電子シンクロトロン（口絵参照）は，原子核物理学や素粒子物理学の実験研究のために，電子のエネルギーを大きくするための大型の装置である，エネルギーを大きくするためには電気力を使う。本章§4でも述べたように電極の間に高周波の電界を作り，それを繰りかえして利用して大きいエネルギーにする（〔3-28図〕)。

〔3-27図〕は電子シンクロトロンの原理を示す。電子はドーナツというあだ名でよばれている細長い真空の管の中を走る。電子は本来は直線に走るので，円形のドーナツの中の軌道を走るためには何かの力を加えて曲げてやる必要がある。この働きは電磁石が行なう。電磁石はコイルに電流を流してその強さを調節できる磁石である。

3-27図　シンクロトロン

一方，電子のエネルギーを大きくするのは〔3-27図〕の電波空洞共振器である。その働きを図解したのが〔3-28図〕である。この空洞の中には非常に周波数の大きい電気振動が起っていて，その電極にあらわれる電荷は，図のように時間によって変っていく。たとえば図の $t=0$ に左の方から入ってきた電子は，電極の間に入ると左の負の電荷に押され，右の正の電荷に引かれてその速さが大きくなる。いや，この節からは速さが大きくなるとはいわないで，エネルギーが大きくなるという方がよい。しかしこのことを承知で，エネルギーが大きくなることを「加速」するということ

3-28図　電波空洞共振器

にする。振動の周期を T として，$t=\frac{T}{2}$ では電極の電荷分動は逆になるから，左から入ってきた電子のエネルギーは加速されないで減速される。$t=T$ に入ってきたものは加速される。

さて，〔3-27図〕で電磁石の強さ，電子の道すじの長さをうまく調節して，電子がいつも空洞の加速の時期に繰りかえし入ってくると仮定しよう。電子シンクロトロンでは実際にそのようにしているのである。空洞でのエネルギーの増大分が V ボルトによる加速に相当するとして，電子が N 回回転すれば，

$$N\times e\times V=\frac{1}{2}mv^2$$

となる。m は電子の質量，v はその速さ，e はその電荷である。これを見ると，N を大きくする，つまり何回でも加速すれば v はどこまでも大きくなるように見える。ところが，電子の速さは相対性原理によって光の速さより速くなることはどうしてもできない。それではどうなっているのであろうか。

運動エネルギーの一般式　このために相対性原理では運動のエネルギーの表現を書き換えるのである。そのときの考え方は次のようである。

(A) 速さが光の速さに近づいたときに運動エネルギーが大きくなるのは，質量が変化するためである。質量の増加が $\varDelta M$ ならば $\varDelta M\times c^2$（c は光の速さ）だけの運動のエネルギーがますものとする。

(B) 静止しているときは運動のエネルギーはゼロである。

電子ばかりでなく，物体の質量は，その速さを v とすれば，速さによって変化し，

$$M=\frac{M_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$M=\frac{M_0}{\sqrt{1-\beta^2}}\quad\left(\beta=\frac{v}{c}\right)\qquad\langle 3\text{-}18\text{式}\rangle$$

のようになっている。M_0 は物体が止っているときの質量であり，c は光の速さである。

M の増加と運動のエネルギー K の増加が，

$$\varDelta K = \varDelta M \times c^2$$

となり，しかも静止しているときに K がゼロになるためには，

$$K = Mc^2 - M_0c^2 = M_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \qquad \langle 3\text{-}19\text{式}\rangle$$

となる。これが86ページの〈3 - 8 式〉$K=\dfrac{1}{2}Mv^2$（M はここでは M_0 とするべきものであるが）に相当するのである。〈3 - 19 式〉は〈3 - 8 式〉とまったく無関係なものではない。われわれの身のまわりのふつうの物体の運動では，v が c にくらべて非常に小さいので，β が非常に小さいとして，数学の方法で近似すると，

$$K \fallingdotseq M_0c^2\left\{\left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right) - 1\right\} = \frac{1}{2}M_0c^2\beta^2 = \frac{1}{2}M_0v^2$$

となって〈3 - 8 式〉に一致する。このようにして〈3 - 8 式〉は〈3 - 19 式〉の特別な場合で，v が c にくらべて小さいときに成り立つものであり，二つの式は矛盾しないのである。

物理学では，異なる表現の間にも調和があるのがふつうであって，〈3 - 8 式〉と〈3 - 19 式〉の関係はその一例である。

終りに相対性原理をとり入れた運動の方程式について述べておきたい。相対性原理をとり入れると質量が変化するので〈3-4 式〉，

$$M_0a = M_0\frac{\varDelta v}{\varDelta t} = F$$

に相当して運動の方程式は，

$$F = \frac{\varDelta(Mv)}{\varDelta t} = \frac{\varDelta\left(\dfrac{M_0v}{\sqrt{1-\beta^2}}\right)}{\varDelta t} \qquad \langle 3\text{-}20\text{式}\rangle$$

となっている。

一方，運動している質量 M の物体の「運動量」p は次の式で

定義される。

$$p = Mv \qquad \langle 3\text{-}21\,式\rangle$$

運動量を使うと，v が小さいときの運動の方程式〈3-5式〉も，相対性原理をとり入れた〈3-20式〉も同じ形となって，

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta(Mv)}{\Delta t} \qquad \langle 3\text{-}22\,式\rangle$$

と書くことができる。

〔3-27図〕の電子シンクロトロンの電磁石の強さはコイルの電流を変えて変化させている。電子はエネルギーをもらうと，はじめに速さが大きくなり，次にその質量が大きくなる。いずれにしても外から力を加えたときに曲りにくくなる。曲りにくいものを曲げるためには磁石の強さを大きくしてやる必要がある。電子がはじめはその速さを，終りにはその質量を大きくするにつれ，それに「シンクロナイズ」して磁石の強さが増大するので，シンクロトロンの名前がついている。

口絵は東京大学原子核研究所の電子シンクロトロンである。この電子シンクロトロンでは電子の最後のエネルギーは1300 MeVである。写真には円形にならんでいる8個の電磁石が見え，極の間にある直径約11 mのドーナツはほとんど見えない。電子は速さゼロで円形軌道に入るのでなく，左上方に見える線型電子加速器によって強力なマイクロ波を用いて直線状に 6 MeV までエネルギーを大きくしてから，円形軌道に打ち込まれる。マイクロ波加速に入る前に電子はふつうの電圧によって 80 kV に加速されるが，そのときにすでに $\beta = \frac{v}{c} \fallingdotseq \frac{1}{2}$ になって，速さは光のそれの1/2 になっている。マイクロ波によって 6 MeV に加速すると $\beta = 0.997$ となり，速さはもう光の速さに近づき，わずか 0.3% 違うだけである。円形軌道に入ったあと，速さの増加は0.3% だけで，近似的にはもう速さは変らないとみてよい。つまりほとんど一定速度で円形軌道をまわることになる。

円形軌道に入ったあと，電子はまわりながら電波空洞共振器でくりかえしエネルギーを大きくされるが，約10万回まわり，その距離は東京からシンガポールに達する。加速が終り，1300 MeVになれば，β の1からの違いは 8×10^{-8} にすぎない。

電子シンクロトロンの加速につれての電子の速さの変化はこのようであるが，質量の増大のありさまはどうなっているであろうか。80 kV で1.16倍，6 MeV で12.7倍となり，1300 MeV では2550倍になっている。

電子が止っているときの静止質量から M_0c^2 を求めると〔2-3表〕に示したように0.51 MeV になる。1300 MeV になって質量が2550倍になると，そのエネルギーも2550倍になるはずで，それがちょうど $0.51\times2550=1300$ MeV となっていることに注意したい。

このようなことは相対性原理から導かれるのだが，実際に電子シンクロトロンを運転し，その中での電子の運動を見ていると，上のような結果は現実に目の前にある。相対性原理を理解できてもできなくても，とにかく承認せざるを得ない事実なのである。

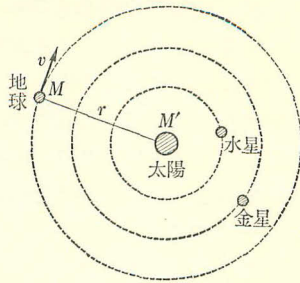
ここで，物体の速さの最高限に関連して相対性原理の話を出したのは，本書の冒頭で述べた質量とエネルギーの関係 $E=Mc^2$（〈1-1式〉）について，なるべく納得した気持になって次の話に移りたいからである。力と運動の関係や運動のエネルギーについて知ったあとで，電子シンクロトロンのような実例を見れば $E=Mc^2$ の関係が何か実感をともなうものになると考えるが，どうであろうか。

§7　太陽と惑星の結合エネルギー

原子力の利用は，原子核の結合エネルギーを利用しているものである。この結合エネルギーは原子の中の結合エネルギーと比較するとわかりやすい。さらに原子の結合エネルギーは，太陽と惑

星の結合エネルギーとくらべると，実感を持って理解できると思う。

3-29図　太陽と惑星

太陽と地球の結合　太陽系の惑星は〔3-29図〕のように太陽のまわりをほぼ円軌道をえがいて回っている。円運動では速さの方向がいつも変化している。地球が円運動をするとき，地球の速さの方向を変化させるのは太陽からうける万有引力である。円運動についてはあとで考えることにして，まずエネルギーについて考えてみよう。

太陽と地球の質量，太陽と地球の距離，地球の運動の速さは次のようである。

〔太陽の質量〕	$M' = 2.0 \times 10^{30}$ kg
〔地球の質量〕	$M = 6.0 \times 10^{24}$ kg
〔太陽と地球の距離〕	$r = 1.5 \times 10^{11}$ m
〔地球の運動の速さ〕	$v = 3.0 \times 10^{4}$ m/sec

これによって地球の位置のエネルギー V を〈3-11式〉から求めると，

$$V = -G\frac{M'M}{r} = -5.4 \times 10^{33} \text{ ジュール}$$

となり，運動のエネルギー K は，地球の運動の速さは光の速さにくらべてひどく小さいから〈3-8式〉で求めて，

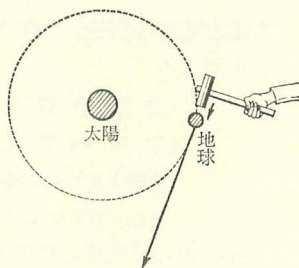
$$K = \frac{1}{2}Mv^2 = 2.7 \times 10^{33} \text{ ジュール}$$

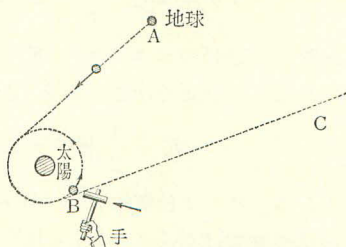
となる。ここで位置のエネルギーと運動のエネルギーを加えたものはゼロではなく，-2.7×10^{33} ジュールとなっている。

結合のエネルギー　さて，太陽と地球の結合のエネルギーを考え

るには，地球が太陽の束縛から離れて脱出するにはどうしたらよいかを考えるとよい。もし地球が太陽から非常に遠方にいくことができて，そこでなお動いていれば完全に脱出できるが，非常に遠方で止っていても脱出である。非常に遠方では距離 r は非常に大きいから $V=0$ であり，止っていれば $K=0$ であるから，$K+V=0$ である。ところが実際の地球の運動では $V+K=-2.7\times10^{33}$ ジュールである。

本章§4で述べたような $V+K=$ 一定の関係は地球が太陽のまわりを運動するときにもあてはまる。$V+K$ がある負の値を持っていればいつまでもその値を保っている。だから地球は太陽から離れないでいる。しかしもし離れるとすれば，考えの上では次のようなおとぎ話になる。

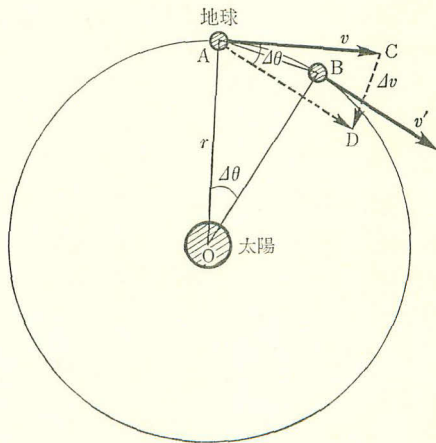
乱暴な話だが，〔3-30図〕のように，神さまに大きい金槌で地球をたたいてもらって，その速さを $v=3.0\times10^4$ m/sec から大きくして，$v'=3.0\times10^4\times\sqrt{2}\doteqdot4.2\times10^4$ m/sec にしてもらえば運動のエネルギーが2倍になって，V と K の総和がゼロになるから，このとき地球は太陽の束縛から脱出することができる。

3-30図　金槌で地球をたたく！？

地球が太陽の束縛から脱出するためには，ちょうど 2.7×10^{33} ジュールのエネルギーを外からもらう必要があることがわかった。これは脱出のエネルギーである。一方結合のエネルギーといえば，この逆の過程を考えるのである。

3-31図　地球が遠方から太陽に近づく

〔3-31図〕のように地球が太陽から非常に遠い点Aにあり，これが太陽に引きよせられて動き出したとする。まっすぐに太陽に向えば，太陽に衝突してしまう。少し横をねらえば図のような軌道をえがく。このとき位置のエネルギーは減少して，運動のエネルギーが大きくなり，全体のエネルギーはゼロである。軌道は図のB, Cとなり，全体のエネルギーがゼロのまま遠方に去る。実際に彗星のうちのあるものはこのような軌道になっている。

この軌道をえがく地球が太陽に束縛されるためには，たとえばB点で運動のエネルギーを失えばよい。ふたたび乱暴なたとえであるが，神さまが大きな金槌で逆方向にたたいて速さを小さくし，方向を変えるとよい。このときに，地球が現在の円運動におちつくためには，ちょうど $K=2.7\times10^{33}$ ジュールの運動のエネルギーを残し，全体のエネルギーが $V+K=-2.7\times10^{33}$ ジュールになればよいのである。この失うべきエネルギーを「結合のエネルギー」という。このエネルギーを失わなかったならば，地球はふたたび遠方に去るのである。いままでに述べてきたことからわかるように，結合のエネルギーは脱出のエネルギーに等しい。

3-32図　円運動の速さと力

円運動と万有引力　太陽に結びつけられている地球の位置のエネルギーと運動のエネルギーを計算したときに，符号は違うが，位置のエネルギーは運動のエネルギーのちょうど2

倍になっていた。これは偶然ではない。運動の方程式からの当然の結果である。

〔3-32図〕は，太陽のまわりに円運動を行なう地球の速さの変化を示したものである。A点で速さが v であったとする。この速さは円の切線の方向に向っている。地球がB点に移れば速さは v' となる。v と v' は大きさは同じであるが方向が違う。速さについて方向の違いも考慮するときに物理学では「速度」とよぶ。

v' を平行に移して，その根元をAにもっていったものがADであるとする。このとき v の先端CからDに向う速度 Δv は v' と v の差である。つまり v に Δv を加えたものが v' となるとする。方向の違う速度のときには加え算をこのように考えて力と運動の関係式が成立しているのである。

AとBが太陽の中心Oで作る角が $\Delta\theta$ であり，地球がAからBに移るための時間が Δt であるとすると，運動の方程式 $F=Ma$ は，

$$G\frac{M'M}{r^2} = Ma = M\frac{\Delta v}{\Delta t}$$

となる。三角形OABと三角形ACDは相似であるから，

$$\frac{\mathrm{AB}}{r} = \frac{\Delta v}{v}$$

となり，$\frac{\mathrm{AB}}{\Delta t}$ は速さ v であるから，

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{r}\frac{\mathrm{AB}}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

となる。これによって，

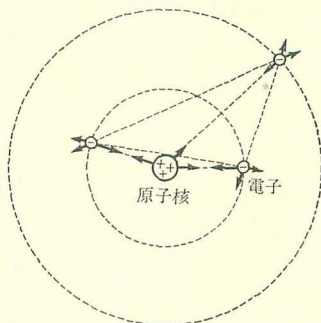
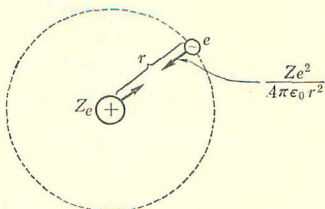
$$G\frac{M'M}{r^2} = \frac{Mv^2}{r},\quad G\frac{M'M}{r} = Mv^2,\quad |V| = 2K \quad \langle 3\text{-}23\text{式}\rangle$$

となって，絶対値で V が K の2倍になっている。つまり，地球などの円運動では位置のエネルギーが運動のエネルギーの2倍になっているのが当然なのである。

地球の軌道は真円でなく少しゆがんで楕円になっているが，円からのずれはわずかであるから，ここの議論はこのままでよい。

§8　原子の結合エネルギー

電気力　原子の構造は〔1-1図〕で示したように，中心の原子核は重く，周囲の電子は軽い。原子核は静止していて，電子がそのまわりを回っているとみてよい。電子と原子核の間に働く力は〈2-3式〉の電気力であり，力が距離 r の二乗に逆比例する点が万有引力と同じであるから，原子の中の力学は太陽系によく似ている。

しかし，たとえば〔3-33図〕のように電荷が原子の中にあるときに，一つの電子は原子核との間に力を及ぼし合うばかりでなく，他の電子との間にも電気力を及ぼし合う。しかしこれらの中で原子核によってうけるものがはるかに大きい。この事情は太陽系でも同じことで，たとえば地球は太陽との間に万有引力が働くばかりでなく，他の惑星との間にも万有引力が働いているのであるが，太陽との間の力が群を抜いて大きいので，太陽だけから力をうけるとしてよかった。原子の場合には，電子と原子核との間の電気力は，大きいには大きいが，太陽系の場合ほどではない。しかし一つの電子の運動に注目するときには〔3-34図〕のように原子核に電荷 Ze が

3-33図
原子の中の電荷は力を及ぼし合う

3-34図　電子がうける電気力

あり，電子はこれだけから力をうけると考えてよい近似を与える。この Z は原子番号である。このようにほぼ実状に近くて，簡単な考え方によってものごとを処理するやり方が近似法であるが，近似法は物理学の常套手段である。まず近似によって解答を出し，実状とのわずかな違いはあとからなんらかの方法によって補正するのである。

さて，原子の中の電子の運動を〔3-34図〕のように近似すると，電子と原子核の間の力は

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} \qquad \langle 3\text{-}24\text{式}\rangle$$

となる。

原子の結合エネルギー　〔3-34図〕のように近似したときの原子の結合のエネルギーについて考えよう。まず電子の持つ位置のエネルギーは，

$$V = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r}$$

であり，電子が半径 r の円を速さ v で走っていれば，その運動のエネルギーは，

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

となる。この m は電子の質量である。このときも太陽系のときの〈3-23式〉に相当して，

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} = mv^2 \qquad \langle 3\text{-}25\text{式}\rangle$$

となるから，位置のエネルギーの絶対値はやはり運動のエネルギーのちょうど2倍になっている。それで全体のエネルギーは負であって，これが結合のエネルギーである。結合のエネルギー W は，

$$W = V+K = \frac{1}{2}|V| = \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} = \frac{1}{2}mv^2 \qquad \langle 3\text{-}26\text{式}\rangle$$

となる。

ここで運動のエネルギーとして，速さが光の速さにくらべて非常に小さいときの式を使ってきた。原子の中の電子の運動についてそれが正しいかどうかを確かめる必要がある。〈3－25式〉で水素を考え，原子の半径を $r=0.53\times10^{-10}$ m，Z を 1，ε_0 には〈2－3式〉のもの，電子の e と m には〔2－2表〕のものを使うと，

$$v = 2.5\times10^6\,\mathrm{m/sec},\quad \beta = v/c = 8.4\times10^{-3}$$

となる。これは§7 で述べた地球の軌道運動の速さよりは大きいが，やはり光の速さよりずっと小さいので，運動のエネルギーとして $\dfrac{1}{2}mv^2$ を使ってよいことになる。

原子の中の原子核と電子の結びつきと，太陽系の結びつきは，ここまでは同じように考えてよい。しかし原子については次の二つの特別な事情がある。

(A)　原子核のまわりを電子が回っていると，それは１種の振動であるから，第２章§8 で述べたように電磁波を出すはずである。電磁波が出ればエネルギーを失うので，結合のエネルギーが大きくなり，半径 r が小さくなっていくはずである。ところが，ふつうのありさまでは原子からは電磁波は出ないし，原子の大きさも変化しない。これはおかしい。

(B)　放電などによって原子を異常状態にすると光を出すが，光の波長は線スペクトルになっていて連続スペクトルではない。原子の構造はこれらの事実を説明できるものでなければならない。

結合エネルギーの非連続性　原子の持っているこの(A)と(B)の性質を説明するために，次のように考える。原子の結合エネルギー W は連続的な値をとることができない。$W_1, W_2, W_3\cdots\cdots W_n\cdots\cdots$ のようなとびとびの値だけをとることができ，その他の値はとれないとする。

この点は太陽系とは違う。水星，金星，地球，火星……のようにいくつかの惑星があって，それぞれの結合エネルギーは水星に

一つ，地球に一つというように，実在するものはとびとびになっている。しかし，地球と金星の間に惑星があり得ないのでなくて，実際にはないというだけである。ところが原子の中では，W_1, W_2……のとびとびの結合エネルギーの間の結合エネルギーはあり得ないというのである。このように惑星の場合と原子の場合ではひどく事情が違う。

原子のときに，W_1, W_2……に相当して，軌道がきまっているが，一つの軌道にあるときは電磁波をまったく出さないで，別の軌道に移って結合エネルギーが変化するときにはじめて電磁波を出すというのである。原子の中の電子のこれらの挙動について説明できるのは量子力学および量子電磁気学である。本書では量子力学について述べることができないのが残念であるが，結果だけ述べたわけである。量子力学の結果について，これも若いときの記憶がある。1930 年に旧制松本高等学校で物理学の講義で原子の結合エネルギーについて量子力学の結果を聞いたときに，「量子力学とはずいぶん勝手なことをいうものですね」と教師に質問して面喰らわせてしまったものである。

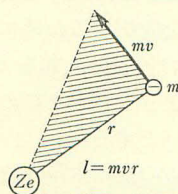
エネルギー準位　さて，原子の中の電子の結合エネルギーがとることができるとびとびの値について，もう少し数量的に考えてみよう。

電子の軌道に制限をつける量子力学の結果は次のようにいい表わすことができる。〔3 - 35 図〕で電子の軌道が半径 r の円であり，その速さが v であるとする。電子の質量を m として mv を運動量とよぶことを§6 で述べた。円運動のときにはさらにこれに半径 r をかけて，

$$l = rmv \qquad \langle 3-27 \text{式} \rangle$$

を「角運動量」とよぶ。角運動量は図の斜線の面積の 2 倍になっている。

3 - 35図　角運動量

量子力学はこの角運動量に制限をつける

のである。すなわち，

$$l = mrv = n\frac{h}{2\pi} \qquad \langle 3-28 式\rangle$$

によって与えられるもの以外の l はないとする。ここに h は第2章§8 でもすでに述べたプランクの常数である。n は 1，2，3，……とつづく整数であり，主量子数という。「主」がつくのは，本書ではふれることができないが，この外の種類の量子数もあるので，「主」な種類というわけである。

〈3-25式〉と〈3-28式〉から v を求めると，$v=\frac{Ze^2}{2\varepsilon_0 nh}$ となり，これを使って，

$$W_n = V + K = -\frac{1}{2}mv^2 = -\frac{1}{8}\frac{mZ^2e^4}{\varepsilon_0{}^2n^2h^2} \qquad \langle 3-29 式\rangle$$

となる。この式の n に 1, 2, 3, ……を入れると，電子がとることができる結合のエネルギーを求めることができる。これらの結合エネルギーに相当する状態をエネルギー準位という。

ちなみに主量子数 n の準位に相当する軌道半径は，

$$r = \frac{\varepsilon_0}{\pi}\frac{n^2h^2}{mZe^2} \qquad \langle 3-30 式\rangle$$

となる。

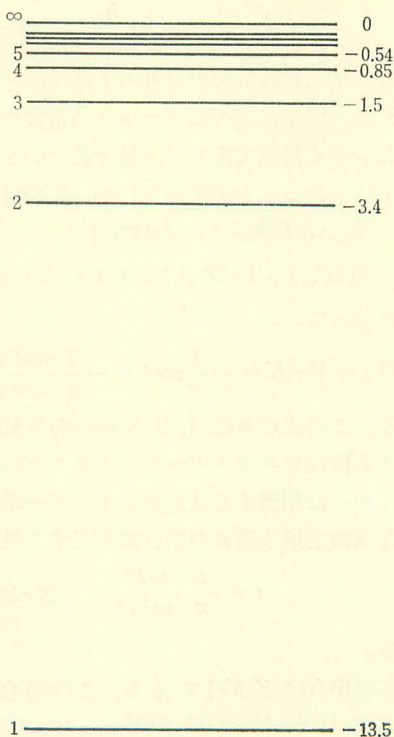
水素の場合は Z が1である。この場合には $W_1=-13.5\,\mathrm{eV}$，$W_2=-3.4\,\mathrm{eV}$，$W_3=-1.5\,\mathrm{eV}$……となり図示すると〔3-36図〕のようである。これらに相当する軌道は〔3-37図〕のようになっている。ふつうのときには電子は $n=1$ の状態にいる。このときの結合エネルギーは 13.5 eV であり，半径は $r_1=0.53\times10^{-10}\,\mathrm{m}$ である。この r_1 を「ボーア半径」という。

〔3-36図〕は水素原子の場合であるが，他の原子では Z が1でない。それで結合エネルギーは〔3-36図〕の Z^2 倍となる。これらのエネルギー準位の主量子数 n は，第2章§6の〔2-15図〕で述べた原子の殻構造の①，②，③……に相当している。量

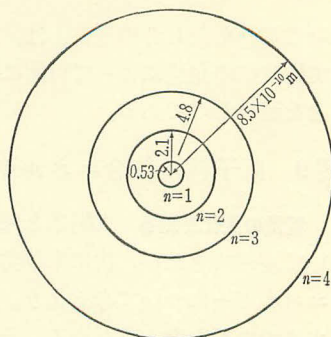
子力学によって $n=1$ の準位には2個の，$n=2$ の準位には8個の電子が入り得る。そのために〔2-15図〕のような殼構造になるわけである。

主量子数＝n 結合エネルギー＝eV

主量子数	結合エネルギー
∞	0
5	−0.54
4	−0.85
3	−1.5
2	−3.4
1	−13.5

3-36図 水素原子の結合エネルギー(エネルギー準位)

結合エネルギーの変化 原子の結合エネルギーの変化について考えてみよう。変化の第1は，原子核から遠くにある電子が原子核に近づいて結合される場合である。このときには，地球と太陽について〔3-31図〕で考えたように，途中で運動のエネルギーを失う必要がある。

地球のときには，神さまが金槌でたたくなどとひどいたとえ話をしたが，原子の場合には，電子のエネルギーが電磁波の形で空間に逃げていけばよい。水素原子のときには遠方の電子が陽子に近づいて 13.5 eV のエネルギーを電磁波，つまり光として放出すればよい。

このようにして電子が陽子につかまれば，安定な水素原子になる。それが何かの原因，たとえば放電の際に原子が他の電子によってたたかれたり，他の光によって刺激されると，電子が，W_2，W_3 などの高いエネルギー準位に上る。このときに W_1 の準位は空席になっているから，W_2 や W_3 の準位から W_1 の準位に落ちてくる。このときに，W_2-W_1，W_3-W_1，……のエネルギーが放出される。これらのエネルギーは光量子として放出されるので，その振動数を ν とすれば，エネルギーは $h\nu$ となるから，

3-37図　水素原子の電子の可能な軌道

$$h\nu_{21} = W_2 - W_1,\quad h\nu_{31} = W_3 - W_1 \qquad \langle 3\text{-}31\text{式}\rangle$$

によって与えられる振動数の光が出てくる。〈3-29式〉を入れると，

$$\nu_{21} = R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{2^2}\right),\ \nu_{31} = R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}\right)\cdots\cdots\nu_{n1} = R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

となる。ここに $R=\dfrac{mZ^2e^4}{8\varepsilon_0{}^2h^2}$ である。また，高いエネルギーを持ったものが W_2 や W_3 の準位に落ちるときもあるので，

$$\nu_{n2} = R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right),\ \nu_{n3} = R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

のような振動数の光も出ることになる。実際にこのような光が出ていることがわかっている。

このように述べると，さきに量子力学があってあとから実際の光が出たように聞えるが，実は逆なのである。このような振動数の光が出ていることがわかって，これによって量子力学の条件が決定されたというのが実際のすがたである。このような光が出て

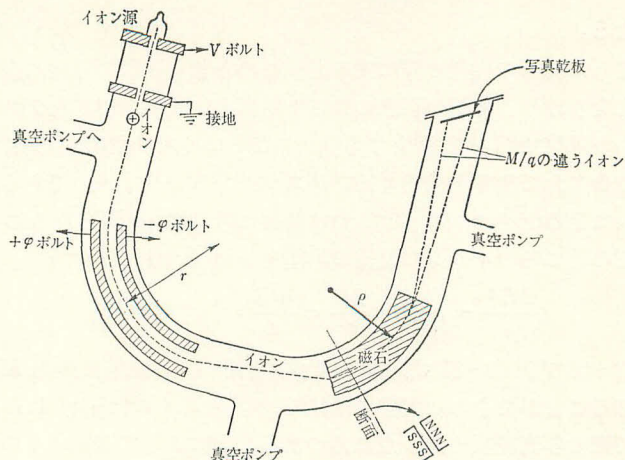
いることをたしかめることは，放電管の技術や光の振動数を測る実験技術の発達によって可能になった。実験結果が量子力学の理論を導いたのである。

§9　原子核の結合エネルギー

質量の変化を測る　太陽系と原子における結合のエネルギーについて述べてきたが，次に原子力に直接の関係がある原子核の結合エネルギーについて考えよう。原子核の結合エネルギーでは，いままでの話と違う点がある。それは結合のエネルギーが大きくなって，結合したときの質量の変化を測定できるのである。太陽と地球の場合にも結合によってエネルギーを失って，全体の質量が少なくなる「はず」であるが，その割合は全体の 10^{-17} にすぎず，とても測定できる分量ではない。原子の場合でも結合によってエネルギーを失い，質量が少くなるが，その割合は 10^{-8} であって，これも測定にはかからない。

原子核の場合にはこれが 10^{-3} 程度になっている。そのために質量の変化を測定することが可能である。といっても，原子核の質量の変化を天秤によって知るのではない。原子をイオンにして真空中で走らせ，磁石の力や電気力で曲げてみて，その曲り方から知るわけである。その装置について少し考えてみよう。

〔3-38図〕はその装置の概略を示すものである。この装置は質量分析計（マススペクトログラフ）といって，J. J. トムソンやラザフォードの研究室でアストンがくふうしたものであるが，さらに世界の各地で多くの人が改良してきている。図はそのひとつのタイプを示す。

まずイオンは真空の中を走るので，気密の管と真空ポンプが必要である。イオンは V ボルトの電圧のところで作られ，接地のところまでくる間に電界によって加速される。イオンの電荷を q クーロン，質量を M kg とし，加速されたあとの速さを v とすれ

3-38図　イオンを電界や磁界でまげて質量を知る

ば，§4 で述べたことによって，

$$\frac{1}{2}Mv^2 = qV,\quad \frac{M}{q} = \frac{2V}{v^2} \qquad \langle 3\text{-}32\text{式}\rangle$$

となる。

イオンは進んで二つの電極の間に入り，一方が負のφボルトに，他方は正のφボルトになっているので，負の方に引かれて曲り，ちょうど電極の間を通るようにする。そのときのイオンの道すじの半径を r m とする。二つの電極の間の距離を d とすれば，電界の強さ E は $2\varphi/d$ となる。イオンの道すじに直角に働く力 qE が，地球の場合と同じように円運動を起しているので，〈3-23式〉を用いて

$$\frac{Mv^2}{r} = qE,\qquad \frac{M}{q} = \frac{rE}{v^2}$$

となり，これと〈3-32式〉から，

$$2V = rE \qquad \langle 3\text{-}33\text{式}\rangle$$

となる。

さらに磁石の磁極の間に入ると，このときも運動の方向に直角の力をうける。磁石の働きの強さを磁界というが，磁界をテスラという単位で測って B とする。テスラというのは地磁気の水平成分をこれで測ると約 3×10^{-5} テスラになるような単位である。これによるとイオンがうける力は軌道に直角に qvB となるので，磁石のところのイオンの軌道の半径を ρ m とすれば，

$$\frac{Mv^2}{\rho} = qvB,\ \ \frac{M}{q} = \frac{\rho B}{v} \qquad \langle 3-34\text{ 式}\rangle$$

〈3-32 式〉〈3-33 式〉〈3-34 式〉を用いて実験結果から M/q を知ることができる。実際には，M が異なるものは道すじが違って図の写真乾板の違う点にあつまることによって測定するのである。

原子核の質量　〔3-38 図〕で測定するものはイオンの M/q である。原子の質量 M_a は，原子核の質量 M_N と Z 個の電子の質量の和である。電子の質量を m とすれば，

$$M_a = M_N + Zm$$

となる。ここで原子の結合による質量の変化は小さくて問題にならない。電荷は中性ならばゼロであるが，イオン化して電子 1 個を失えば，$q=e$，2 個失えば $q=2e$，一般に ν 個失えば $q=\nu e$ となる。ν を用いて M と q を一般的に書けば，

$$q = \nu e,\quad M = M_N + (Z-\nu)m \qquad \langle 3-35\text{ 式}\rangle$$

となる。ここで m は M_N にくらべて相当に小さいことに注意する必要がある。

〔3-38 図〕の装置は，はじめのものはもっと簡単なものであった。それを用いて J. J. トムソンは 1906 年には同位元素の発見をした。つまり，リシウムに質量数が 6 と 7 のものがあり，ネオンに 20，21，22 のものがあることを発見したのである。

J. J. トムソンが実験したときは，20 と 21 のちがいを見わけ

る程度のものであったが，その後，改良によって質量弁別の精度が上った。そして原子または原子核の質量の相対値を10万分の1またはそれ以上の精度で測れるようになっている。

〔3-1表〕に，原子の質量の例を示す。このような表では原子核の質量 M_N でなく，原子の質量 $M_a=M_N+Zm$ を示すのがふつうである。また相対値であるから，原子の中でどれを基準にとってもよいわけで，長い間 $^{16}O=16.00000$ としてこれを基準としてきたが，最近化学との関係のために $^{12}C=12.00000$ とするように世界的に約束が変更された。〔3-1 表〕の値を原子の「原子量」といい，原子量に g をつけたものは原子がアボガドロの数 L 個あつまったときの質量である。

この表に出ているように原子量をこんなに精度高く知るのには，質量分析計を用いるほかに，原子核反応も利用されている。つまり，原子核反応で出てくるエネルギーがわかると，反応の前後の原子核の質量に対し

原　子	Z	A	原子の相対質量（原子量）
$^{1}_{0}n(n)$	0	1	1.008,665,1
$^{1}_{1}H(p)$	1	1	1.007,825,2
$^{2}_{1}H(D)$	1	2	2.014,102,2
$^{4}_{2}He$	2	4	4.002,603,2
$^{6}_{3}Li$	3	6	6.015,124
$^{7}_{3}Li$	3	7	7.016,004
$^{9}_{4}Be$	4	9	9.012,207
$^{12}_{6}C$	6	12	12.000,000,0*
$^{13}_{6}C$	6	13	13.003,409
$^{14}_{7}N$	7	14	14.003,744
$^{16}_{8}O$	8	16	15.994,915
$^{19}_{9}F$	9	19	18.998,405
$^{20}_{10}Ne$	10	20	19.992,440
$^{23}_{11}Na$	11	23	22.989,77
$^{24}_{12}Mg$	12	24	23.985,042
$^{27}_{13}Al$	13	27	26.981,539
$^{28}_{14}Si$	14	28	27.976,929
$^{35}_{17}Cl$	17	35	34.968,851
$^{40}_{18}A$	18	40	39.962,385
$^{52}_{24}Cr$	24	52	51.940,513
$^{56}_{26}Fe$	26	56	55.934,937
$^{60}_{28}Ni$	28	60	59.930,786
$^{84}_{36}Kr$	36	84	83.911,503
$^{118}_{50}Sn$	50	118	117.901,606
$^{158}_{64}Gd$	64	158	157.924,17
$^{195}_{78}Pt$	78	195	194.964,81
$^{226}_{88}Ra$	88	226	226.025,43
$^{235}_{92}U$	92	235	235.043,94
$^{238}_{92}U$	92	238	238.050,81

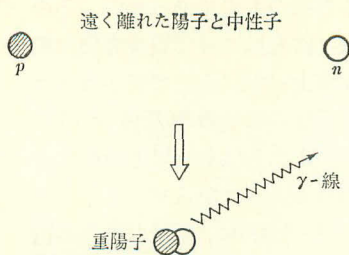
3-1表　原子量の例（*基準）

て資料を与えるわけである。これについては第5章でふたたび述べることにする。

3-39図
陽子と中性子が結合して重陽子となる

原子核の結合エネルギー　一般の原子核の結合エネルギーについて考える前に，まず重陽子について考えよう。重陽子は一つの陽子と一つの中性子が結合しているもので，もっとも簡単な場合である。〔3-39図〕のように，遠くに離れていた陽子と中性子が近よってきて結合する場合を考える。地球が太陽に結合されるときは万有引力が働き，電子が原子核に結合されるときは電気力が働いて，それらの力は距離の2乗に逆比例することでは似ていた。原子核のときには，陽子と中性子の間の力は核力であって，遠方ではまったく働かないで，きわめて近距離，つまり 10^{-15} m になってから強い力が働くので，太陽系や原子とは運動状態は変っている。それでも，力が及ぶようになってからは，位置のエネルギーと運動のエネルギーを考えることは同じである。この二つのエネルギーの和はふつうに運動していれば一定であるものが，エネルギーの一部を失って結合されるわけである。

結合のときに失うエネルギーを ΔE とすれば，ΔE は二つの面から検討することができる。まず，ΔE は電磁波として失われるから，$h\nu=\Delta E$ の光量子が γ-線として出ているはずである。一方，陽子と中性子が結合して重陽子となれば $\Delta M=(\Delta E/c^2)$ だけ質量を失っているはずである。

光量子の方は，γ-線が他の原子の中の電子をつきとばすことを利用してそのエネルギーを知ることができる。うまくつきとばすと，γ-線のエネルギーの全部が電子に移ることができるので，つきとばされた電子の中でエネルギーのもっとも大きいものを知れ

ば，そのエネルギーが γ-線のエネルギーになっている。このようにして測定したものは 2.22 MeV である。

質量の減少は，陽子の質量を M_p，中性子の質量を M_n，重陽子の質量を M_D とすれば，

$$\varDelta M = (M_p + M_n) - M_D$$

であるが，M_p に電子の質量 m を加えると〔3-1表〕の ${}^1_1H$ の質量になり，M_D に m を加えると ${}^2_1H$ の質量となる。

$$\varDelta M = (M_p + m) + M_n - (M_D + m) = {}^1_1H + M_n - {}^2_1H$$

となるので，〔3-1表〕の原子の質量を使って $\varDelta M$ を求めることができて，$\varDelta M = 0.002,398$ となる。この $\varDelta M$ がエネルギーになるわけである。しかしこのエネルギーは一つの重陽子に関係したものではない。一つの重陽子あたりのエネルギーにするには，どうしたらよいだろうか。

〔3-1表〕の数字には単位が書いてない。原子の質量の比を示しているにすぎない。しかし，仮りに水素原子ならば ${}^1_1H = 1.008,665$ g，重水素ならば ${}^2_1H = 2.014,102$ g，炭素ならば ${}^{12}_{6}C = 12.000,000$ g の分量を持ってくれば，その中に水素原子，重水素原子，炭素原子が，それぞれアボガドロの数 $L = 6.023 \times 10^{23}$ 個が入っている。〔3-1表〕から求めた $\varDelta M$ を $\varDelta M$ g とすれば，これがエネルギーになったものは $L = 6.023 \times 10^{23}$ 個の重水素に関係している。したがって $\varDelta M$ を kg であらわして $\varDelta M \times 10^{-3}$ kg とし，

$$(\varDelta M \times 10^{-3} \times c^2)/L = 3.57 \times 10^{-13} \text{ ジュール}$$

が重陽子一つあたりの結合エネルギーとなる。これを電子ボルトに直すと 2.22 MeV となって，γ-線のエネルギーに一致する。第1章§5 で述べたように，リシウムと陽子による原子核反応によってエネルギーと質量の関係 $E = Mc^2$ を実験的にたしかめているが，ここに述べた重陽子の結合の際の質量の減少と，出てくる γ-線のエネルギーとが一致することは，さらに $E = Mc^2$ を実験によってたしかめたことになっている。

〔3-40図〕は二つの陽子，二つの中性子が結合して α-粒子になるときの図である。このときも結合による質量の減少は，

$$\varDelta M = (2{}^{1}_{1}\mathrm{H}+2M_n)-{}^{4}_{2}\mathrm{He} = 0.030,377$$

であり，これを ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ 1個あたりのエネルギーに換算すると 28.3 MeV となる。

3-40図　α-粒子の結合

一般に Z 個の陽子と N 個の中性子が結合して，原子量が M_a の原子核になったとすれば結合のときの質量の減少は，

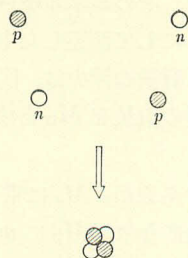
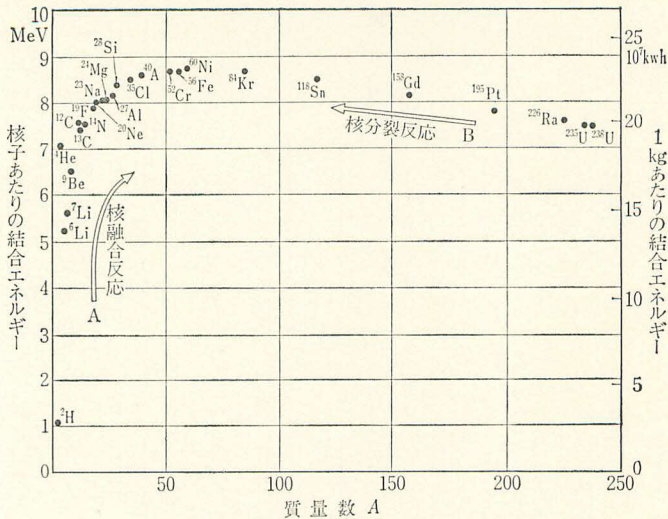
$$\varDelta M = (Z\times{}^{1}_{1}\mathrm{H}+N\times M_n)-M_a$$

によって求めることができる。

原子核が Z 個の陽子と N 個の中性子で作られているときには，$A=Z+N$ は質量数である。陽子と中性子をまとめて核子とよぶから A は原子核の中の核子の数である。原子核の結合エネルギー $\varDelta M\times c^2$ を A で割ったものは核子一つあたりの結合エネルギーである。

$$核子あたりの結合エネルギー = \frac{\varDelta M\times c^2}{A}$$

この核子あたりの結合エネルギーを図示したものが〔3-41図〕である。縦軸の左は核子あたりの結合エネルギーを MeV であらわし，右は 1 kg あたりの結合エネルギーを kWh であらわしてある。横軸は質量数 A である。

核子あたりの結合エネルギーは質量数が約50の鉄のあたりで最大でおよそ 9 MeV になっていて，質量数がこれより少なくても多くても核子あたりの結合エネルギーは小さくなる。つまり鉄あたりより質量数の小さい原子核では，原子核と原子核が結合して A が大きくなると結合エネルギーがより大きくなる，つまりエネルギーが出てくることになる。このような反応をエネルギー源に利用しようとするのが第7章で述べる核融合反応である。核

3-41図　核子あたりの結合エネルギー

融合反応は図の矢印 A の方向に向うものであるということができる。

原子核が鉄のあたりより重いと結合エネルギーの変化は逆になり，原子核が分裂する，つまり軽い方向に移るとエネルギーが出てくる。核分裂反応はこの場合に相当している。このような反応の方向を図で矢印 B で示してある。

このように，〔3-41図〕に示された核子あたりの結合エネルギーの関係は，原子核反応からエネルギーをとり出すことを考えるときに大切なものである。

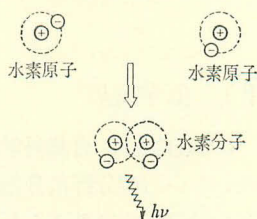
第4章　化学反応とエネルギー

§1　化学反応

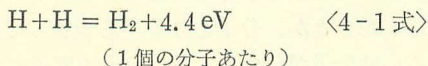
化学反応とは　自然科学は，物理学，化学，生物学，地質学などのいろいろの分野に分類されている。この中の化学について私どもが若い時に教えられたことは，化学は物質が変化する現象を扱う学問であるということであった。なるほどそうであるが，いまでは化学の立場はもっとはっきりしたものになっている。すなわち，原子が結合したり分離したりする反応，原子の離合集散を扱う学問が化学であるとするのである。つまり，原子があつまって分子になる場合とか，分子と分子があつまって他の分子になる場合，あるいは分子が分離して他の分子や原子になる場合を扱うわけである。

化学反応のもっとも簡単な例は二つの水素原子が結合して水素分子になる場合であって，この結合を，原子核を「芯」，そのまわりの電子を「衣」とよぶやり方でたとえると，次のようになる。原子と原子の結合は，衣と衣がからみ合ったようなものであって，芯の方は何の変化もうけていない。芯がもとのままならば，何かの原因で衣と衣のからみ合いがとけて離れても，原子はもとのすがたのままである。つまり，原子と原子とが結合しても，原子の周辺の電子の部分でからみ合っているのであって，原子核は何の変化もうけていない。原子核が何の変化もうけないということは，原子が変化をうけないこととほとんど同じである。原子から電子をもぎとるようなことがあっても，原子核さえ変らなければ，すぐ電子をどこかで拾ってもとの姿にもどるからである。ここで原

子のまわりにいくつの電子が，どのように分布するかは，原子核がきめているということと，電子はどの電子でもまったく区別がないということに注意する必要がある。

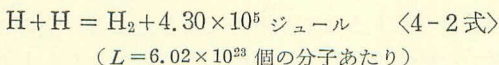
化学反応のエネルギー　原子と原子が結合して分子となるときにも，原子核と電子が結合して原子を作るときや惑星と太陽とが結合するときと同じように，結合のエネルギーがある。

〔4-1図〕のように，離れている二つの水素原子が結合して分子となるときに結合エネルギーを放出する。結合エネルギーは，多くの場合光量子として，つまり光や熱の形で放出される。一つの分子あたりの結合エネルギーは 4.4 eV であるから，

4-1図
水素原子が結合して分子になる

$$H+H = H_2+4.4\,\mathrm{eV} \qquad \langle 4\text{-}1式\rangle$$

（1個の分子あたり）

と書く。この式は1個の分子あたりであるが，これをアボガドロの数 L 個だけ分子があつまったものについて書くと，このときも H や H_2 は同じ符号を用いるので，

$$H+H = H_2+4.30\times10^5\ ジュール \qquad \langle 4\text{-}2式\rangle$$

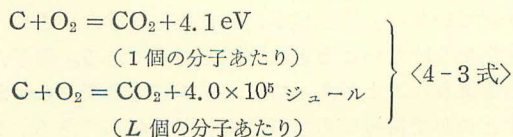
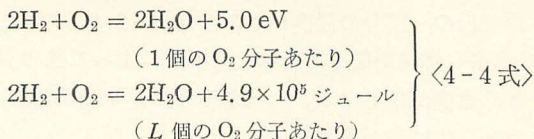
（$L=6.02\times10^{23}$ 個の分子あたり）

となる。この式ではエネルギーをジュールであらわした。

われわれが日常使う燃料は石炭，石油，木材などであるが，これらが燃焼するときの基本的な化学反応は炭素や水素の燃焼である。炭素の燃焼についての反応式と結合エネルギーは，

$$\left.\begin{array}{l} C+O_2 = CO_2+4.1\,\mathrm{eV} \\ \quad（1個の分子あたり） \\ C+O_2 = CO_2+4.0\times10^5\ ジュール \\ \quad（L\ 個の分子あたり） \end{array}\right\} \langle 4\text{-}3式\rangle$$

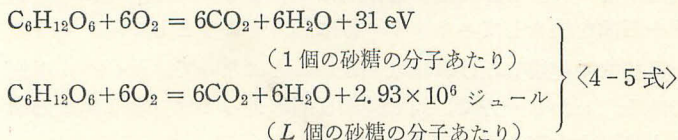
である。また水素の燃焼については，

$$2H_2+O_2 = 2H_2O+5.0\,\mathrm{eV}$$
（1個の O_2 分子あたり）

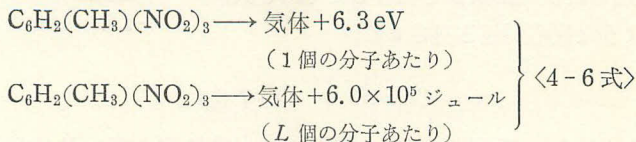
$$2H_2+O_2 = 2H_2O+4.9\times10^5 \text{ ジュール}$$
（L 個の O_2 分子あたり）　〈4-4式〉

となる。

もっと複雑な分子の燃焼の例としては，澱粉，砂糖，繊維素など炭素 C と水 H_2O が結びついて一般に含水炭素といわれているものがあるが，そのひとつ砂糖の燃焼は次のようになる。

$$C_6H_{12}O_6+6O_2 = 6CO_2+6H_2O+31\,\mathrm{eV}$$
（1個の砂糖の分子あたり）

$$C_6H_{12}O_6+6O_2 = 6CO_2+6H_2O+2.93\times10^6 \text{ ジュール}$$
（L 個の砂糖の分子あたり）　〈4-5式〉

〈4-3式〉〈4-4式〉〈4-5式〉を見ると，分子あたりの結合エネルギーには大小があるが，酸素分子1個あたりにするとおよそ5eVになっている。また爆薬に使われるトリニトロトルエン(TNT)の爆発のときに出てくるエネルギーは，

$$C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3 \longrightarrow \text{気体}+6.3\,\mathrm{eV}$$
（1個の分子あたり）

$$C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3 \longrightarrow \text{気体}+6.0\times10^5 \text{ ジュール}$$
（L 個の分子あたり）　〈4-6式〉

となる。この爆発では酸素は外部から供給される必要はなくて，分子の中の酸素が，炭素や水素と化合する。

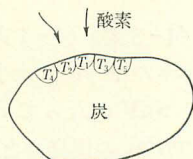
§2　燃焼と爆発——エネルギーの利用

連鎖反応　原子炉や原子爆弾における反応は連鎖反応であることはすでに述べた。一方，ふつうの燃焼も連鎖反応である。たとえば乾いた紙屑の山にマッチ1本で火をつければ，あとはどんどん自然に燃えていく。マッチ1本で火をつけることは，ウラニウ

ム 235 を用いた炉に中性子が一つとび込んできたことに相当する。マッチ１本で紙の一部分の温度が上ると，〈4-3式〉の炭素，〈4-4式〉の水素の燃焼が起り，さらにその熱によって他の部分の温度が上り，燃焼がはじまる。これを繰りかえすのが連鎖反応である。このときには熱が連鎖反応のなかだちとなっている。石炭，石油，木材，ガスなどの燃焼も，このような熱をなかだちとする連鎖反応である。

われわれがエネルギー源として利用する化学反応はみんな連鎖反応になっている。反応が連鎖的に進行するのでなかったら，石炭や石油を燃やしてエネルギー源に利用しようとしても，マッチを連続的に使用しなければならないことになって，たいへん不便である。しかし一方で，同じ連鎖反応によってマッチ１本から家の火事，山火事などが起ることになる。

燃焼の連鎖反応をもう少し突っ込んで考えてみよう。〔4-2図〕は炭が酸素の中で燃える図である。炭の温度を絶対温度で T とすれば，炭素が酸素と化合して〈4-3式〉のような反応が起る速さ v は，

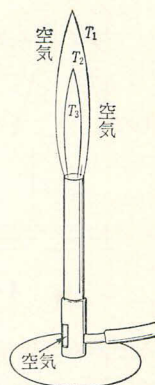
酸素
T_4 T_2 T_1 T_3 T_5
炭

4-2図　炭の燃焼

$$v = Ce^{-\frac{A}{RT}} \qquad \text{〈4-7式〉}$$

のようになっている。C は定数，e は自然対数の底，R は気体定数といわれるもの，また A は活性化エネルギーとよばれるものである。温度 T が上ると v は大きくなる。炭の燃焼の場合には A は 30 kcal とされているので，25°C (T＝298°K) のときに v が v_0 ならば，100°C では $v=10^4v_0$，500°C では $v=10^8v_0$ となって，温度によって大きく変る。炭のある部分の温度が上ったために燃焼反応がはげしく起ると，そこから出た熱が近くの部分に伝わってさらに温度が上り，燃焼が速くなる。図の T_1 の温度が上れば隣りの T_2 や T_3 が高くなり，T_4，T_5 も高くなる。このよ

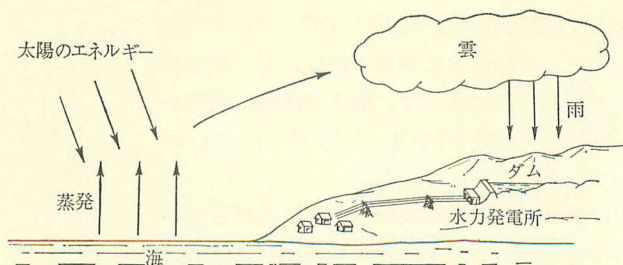
うにして燃焼がどんどんとひろがっていく。

ただし，このときに酸素の供給が充分であると考えているのであって，酸素の供給に制限があれば，反応の速さは〈4－7式〉通りにはいかないで，もっとおそくなる。

炭の場合には温度の高い場所がひろがっていくのであるが，ガス・バーナーの場合には〔4－3図〕のように，燃える部分が進行する速さとガスが吹き出る速さとが一致して，燃える部分は止っているように見えるわけである。炎への酸素の供給はふつうのガス・バーナーでは炎のところだけでなく，下の方から空気を入れて，あらかじめ空気とガスを混合しておいて，燃焼を助けている。

4-3図
石炭ガスの燃焼

爆発　水素ガスと空気の混合物は電気火花やマッチなどの刺激によって爆発することはよく知られている。水素ガスばかりでなく，家庭用の石炭ガスやプロパンも条件によって爆発する。自動車などのガソリンエンジンではガソリンと空気の混合物の爆発を利用している。このような気体の爆発は，燃焼と同じ連鎖反応であるが，反応の伝播する速さがふつうの燃焼にくらべていちじるしく大きい点に違いがある。伝播速度が大きくなる原因が何であるかは別として，このような大きい伝播速度が起るためには，ガスと空気の混合の割合がある値になっていることが必要である。水素と空気の混合物では，水素が4％以下では爆発が起らないし，また75％を越しても起らない。プロパンの場合では2％以下では起らないし，9.5％を越えても起らない。

§3　光合成——エネルギーを貯える

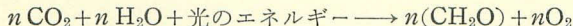
これまで化学反応のエネルギーのことを述べたのは，核分裂や核融合によるエネルギー利用とくらべて理解していただきたいか

4-4図　水力発電は太陽エネルギーを利用している

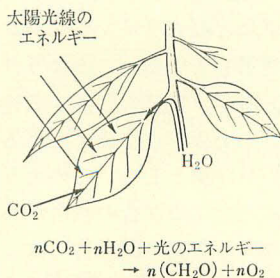
らである。化学反応にせよ核反応にせよ，人類が物質に貯えられているエネルギーを熱の形でとり出して消耗していくのだが，地球上では，貯えを消耗するのでなく，貯えを増す現象も起っている。たとえば〔4-4図〕のような水力発電では，太陽熱によって海水が蒸発し，雲になって山に雨を降らし，その水が発電を行なう。このときは太陽熱を使うので，石炭，石油などの地球上の貯えを減らさないですむ。

同じく太陽のエネルギーを利用してエネルギーを貯える反応に植物が行なっている光合成がある。これは〔4-5図〕のように，葉など緑色の部分で，植物の中にある水と空気中の二酸化炭素をとり入れて，砂糖，澱粉，繊維素などの含水炭素を作りだし，植物体内に貯えるのである。その反応は，

$nCO_2 + nH_2O +$ 光のエネルギー
$\rightarrow n(CH_2O) + nO_2$

4-5図　光合成

$$nCO_2 + nH_2O + \text{光のエネルギー} \longrightarrow n(CH_2O) + nO_2$$

〈4-8式〉

で，nを6にとれば〈4-5式〉の砂糖の燃焼の逆反応になっている。つまり太陽のエネルギーを利用して吸熱反応を起すのである

が，植物の葉は温度が高いわけでもなく，風にそよいでいるだけである。いかにも巧妙な反応であるが，これは葉の中の葉緑素が触媒となって進行させることがわかっている。しかし，この葉緑素の働きのこまかいことはいまでも，すっかりわかったとはいえない。葉緑素の不思議な働きは生命現象の不可思議さにもつながっているのである。

光合成によって植物の中に貯えられた澱粉や繊維素は，草食動物の食料になる。肉食動物は草食動物の肉を食べる。草食にしても，肉食にしても，もとは光合成によって作られたものに依存して生活していることになる。これらの動物の体内では〈4－5 式〉のような含水炭素の燃焼反応が起り，このエネルギーによって体温を支え，いろいろの仕事をしているわけである。

繊維素は木材となり，燃料として人間生活のエネルギー源となるし，また石炭，石油も，過去に地球上で光合成によって育った植物や，それを食べて育った動物によって作られたものなのである。

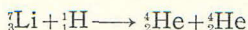
このように考えると，われわれが日常に利用しているエネルギーはみな，現在または過去の太陽のエネルギーに出発している。そしてあとで述べるように，太陽のエネルギーの源は太陽の中で起っている原子核反応である。われわれがふつうに利用しているエネルギーは，このようにしてもとをたどると原子核反応に行きつくのである。

第5章　原子核反応とエネルギー

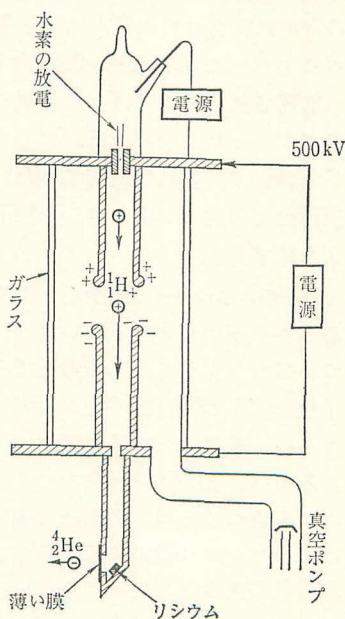
§1　リシウム7と陽子の反応

第2章では物質の構造について，第3章では物質の中で起っている現象を理解するために力やエネルギーについて，それぞれ勉強した。この章ではこれらの知識を使って原子核反応を理解することにしよう。つまり，原子核反応を数量的に理解しようというわけである。原子核反応の例は非常に多いので，その全部について述べることは不可能であり，意味もない。二，三の例から全般の理解をしていただくことにする。

まず第1章でとりあげた，リシウム $^{7}_{3}Li$ と陽子 $^{1}_{1}H$ から α-粒子（ヘリウム原子核）を作った〈1-2 式〉の反応，

$$^{7}_{3}Li+^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He+^{4}_{2}He$$

を考えよう。この反応を起させる装置の概略を〔5-1図〕に示す。

5-1図
リシウムと陽子からα-粒子を作る

上部にあるのは水素の放電管で，ここで放電によって水素原子を陽子と電子に分け

る。つまりイオンにするわけである。陽子を加速してリシウムに向って走らせ，充分に近づけて原子核反応を起させるのが目的であるが，加速するのは電気力によるので，電気的に中性の水素原子や水素分子ではどうにもならない。そこでイオン，つまり電荷を持つ粒子にして電気力によって加速するのである。放電管の下はガラス筒で上下に電極がある。ガラス筒の中は陽子が自由に運動でき，加速によってもらったエネルギーを他の分子との衝突によって失わないように，よい真空にしてある。上の電極には正の 500 kV の電圧をかける。こうして上の電極には正，下の電極には負の電荷があらわれ，この二つの電極の間に陽子がくると，正の電荷に押され負の電荷に引っ張られて加速される。そしてそのエネルギーは 500 keV＝0.5 MeV になる（第3章§4参照)。

加速された陽子は下方で金属リシウムに衝突する。そして $^{7}_{3}$Li にぶつかったものの一部が反応を起して，$^{4}_{2}$He すなわち α-粒子がとび出す。これを観測するためには，リシウムの前の壁を薄い雲母などの窓にしておき，α-粒子がこれを貫いて外にとび出せるようにする。

陽子のエネルギー　陽子がリシウムの原子核に衝突するためにはあるエネルギーを持っていなければならぬといったが，この点についてもう少しくわしく考えてみよう。そのためにはリシウム原子核と陽子の間に働く力による位置のエネルギーを考えるとよい。リシウム原子核と陽子の間には，ある距離 r_0 より離れているところでは，互いにクーロンの法則による電気的斥力が働いている。r_0 より近づくと核力が働いて強い引力が加わり，陽子がうける力はクーロンの法則によるものとは大きく変ってくる。この r_0 は原子核の大きさといってもよい。原子核の大きさは原子核によって違うが，次の式であらわすことができるとされている。

$$r_0 = 1.2\times10^{-15} A^{1/3} \text{ メートル} \qquad \langle 5-1 \text{式}\rangle$$

ここで A は質量数で，原子核の中の陽子と中性子の数の和を示

す数である。

原子核の電荷 Ze と陽子の電荷 e との間に働く力の大きさは，その間の距離を r とすれば，

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2}$$

となる。これは原子の中の原子核と電子の間に働く力を示した〈3-24式〉(110ページ)と同じ形であるが，電子の電荷が $-e$，陽子の電荷は $+e$ であるから，Fの符号は反対にすべきである。この力による位置のエネルギーVは，符号を考えに入れて，

$$V=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r} \quad 〈5\text{-}2式〉$$

となる。この位置のエネルギーが成り立つのは r_0 に陽子の半径を加えた距離 r_1 までである。r_0 はいま考えている場合については $A=7$ を入れて 2.3×10^{-15} m となり，これに陽子の半径 1.2×10^{-15} m を加えると $r_1=3.5\times10^{-15}$ m となる。${}^7_3$Li と陽子の間の距離と位置のエネルギーの関係を書くと〔5-2図〕のようになって，r_1 における位置のエネルギーは 1.2 MeV になる。

5-2図
${}^7_3$Liと陽子の間の位置のエネルギー

ここで陽子が ${}^7_3$Li に衝突する話にもどろう。太陽と地球，原子核と電子の間には引力が働き，遠く離れていたものが近づくにつれて運動のエネルギーが大きくなり，位置のエネルギーの絶対値は大きくなるが，負号のために小さくなって，その和は一定であった。陽子と原子核では，力が斥力であるから，はじめに止っていたのでは斥けられてまったく近づくことができない。はじめからあ

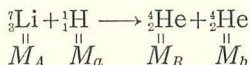
る運動のエネルギーを持って原子核に向って走り，近づくと位置のエネルギーが増すから運動のエネルギーが減少して，その和は一定になる。このためにはじめに運動エネルギーを用意するのが〔5－1図〕のような装置，あるいはサイクロトロンの役目である。

クーロン障壁を抜けて　さて〔5－2図〕で見ると，陽子が r_0 まで近づくためには，ここで運動のエネルギーがゼロになるとすると，遠方で位置のエネルギーの方がゼロのところでは 1.2 MeV の運動のエネルギーを持っていなければならないことになる。この意味で〔5－2図〕は陽子が越えねばならない山のようなもので「クーロン障壁」とよばれている。〔5－1図〕の装置でコッククロフトが加速した陽子のエネルギーは 0.5 MeV であって，これではクーロン障壁を越すことはできず，r_1 で追い返えされてしまうはずである。しかし実際には陽子は $^7_3$Li にとび込んで，原子核反応を起すことができた。これは実は量子力学の原理による幸運のためである。

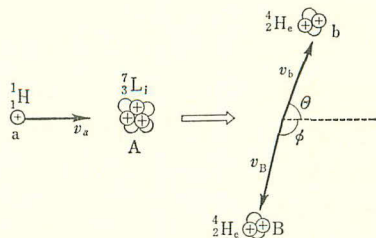
物理学には「エネルギー保存の法則」があり，原子の中の電子や原子核のまわりの陽子の運動で，位置のエネルギーと運動のエネルギーの和が一定とするのもその一例である。陽子が仮りに r_1 から r_0 に動いてクーロン障壁をつき抜けるとすれば，それに必要な時間は，陽子が速いのと障壁が薄いために 10^{-21} 秒である。こんなに短い時間では，量子力学の不確定性原理のためにエネルギー保存の法則は大目にみてもらえるのである。陽子がクーロン障壁をつき抜ける前とあとについてはエネルギー保存の法則は成立しなければならない。つき抜ける間だけエネルギー保存の法則をゆるめてもらえるのである。このように，陽子などが古典的には越えられない障壁をつき抜けることを「トンネル効果」とよんでいる。〔5－1図〕の装置による $^7_3$Li の核反応はトンネル効果によって起ったのである。トンネル効果によるとしても陽子のエネルギーが大きくなればなる程，障壁をつき抜ける確率は大きくな

る。この確率の大きさは量子力学によって計算することができる。

反応におけるエネルギー　さて，反応が起ったとして，反応の前後のエネルギーがどのように変化するかを考える。まず〈1-2式〉の反応の前後の粒子の質量を次のようにきめよう。

$$\underset{M_A}{{}^7_3\mathrm{Li}} + \underset{M_a}{{}^1_1\mathrm{H}} \longrightarrow \underset{M_B}{{}^4_2\mathrm{He}} + \underset{M_b}{{}^4_2\mathrm{He}}$$

M_B と M_b はともに ${}^4_2$He で質量は同じであるが，計算に一般性を持たせるために別の値として扱っておく。第1章で述べたように反応の前後の粒子の質量の和は等しくない。

$$\left.\begin{aligned} \Delta M &= (M_A+M_a)-(M_B+M_b) \\ Q &= \Delta M \times c^2 \end{aligned}\right\} \text{〈5-3式〉}$$

によって与えられるエネルギーが反応の後に現われる。この Q を反応の Q-値という。反応のときにこのエネルギーが現われることを考えに入れて，反応の前後の粒子の速さ，方向について考えてみよう。〔5-3図〕で，陽子が速さ v_a で ${}^7_3$Li に衝突し，反応のあと二つの ${}^4_2$He が v_a の方向に対して角度 ϕ と Θ の方向に，速さがそれぞれ v_B と v_b でとび出したとしよう。

5-3図　反応粒子の速さと方向

ここでエネルギー保存の法則は，

$$\frac{1}{2}M_a v_a{}^2 + Q = \frac{1}{2}M_B v_B{}^2 + \frac{1}{2}M_b v_b{}^2 \qquad \text{〈5-4式〉}$$

となる。また，運動量も保存するので，

$$\left.\begin{aligned} M_a v_a &= M_B v_B \cos\phi + M_b v_b \cos\Theta \quad (v_a \text{に平行}) \\ M_B v_B \sin\phi &= M_b v_b \sin\Theta \qquad\qquad\quad (v_a \text{に垂直}) \end{aligned}\right\} \text{〈5-5式〉}$$

となる。速さが光の速さに近づくと，エネルギーや運動量は相対

性原理による一般式を用いるべきであるが，ここで扱う粒子の速さは光の速さより小さいので，運動のエネルギーを $\frac{1}{2}Mv^2$，運動量を Mv であらわす近似的な式を使ってよい。反応のときに現われるエネルギー Q がわかっていれば，〈5-4式〉〈5-5式〉を使って Θ の方向に出てくる粒子の速さとエネルギーを求めることができる。しかし道すじを変えて，Θ の方向に出てくる粒子のエネルギーを測定して，逆に Q を求めることもできる。その式は〈5-4式〉〈5-5式〉から求められるもので，

$$Q=\frac{M_b+M_B}{M_B}E_b-\frac{M_B-M_a}{M_B}E_a-\frac{2\sqrt{M_aE_aM_bE_b}}{M_B}\cos\Theta$$

〈5-6 式〉

となる。ここに E_b と E_a は粒子 b と a のエネルギーである。とび込む陽子のエネルギー E_a にくらべて Q が大きく，したがって E_b にくらべて E_a が小さいと，この式は近似的に，

$$Q\doteqdot\frac{M_b+M_B}{M_B}E_b$$

となり，いま考えている〈1-2式〉の反応では M_B と M_b は等しいから $E_b=Q/2$ となり，E_B も同じ大きさになって，エネルギー Q を二つの α-粒子が仲よく等分していることになる。

第1章 §5 で，消滅した質量がエネルギーに変る関係がこの反応によって実験的に証明されたとしたのは，次のような事情である。まず〈5-6式〉を用いて，実験によって Q-値を求める。一方，反応粒子の質量は〔3-1表〕によってわかるから，これによって $\varDelta M$ を求め，これから $Q=\varDelta M\times c^2$ を求める。実験によって求めた Q-値がこの $\varDelta M$ から求めたものに実験誤差の範囲で一致していたので，Mc^2 がエネルギーになることが実験的に証明されたのである。

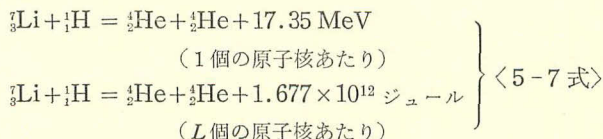
ここで実際に出現するエネルギーがどのくらいになるか計算しておこう。〔3-1表〕によって $\varDelta M$ を求めると，

$$\Delta M=(7.01600)+(1.00783)-2(4.00260)=0.01863$$

となるが，これはアボガドロの数L個の原子核が反応を起したときに消滅する質量をグラムであらわしたものである。これをエネルギーに換算すると，

$$Q=(1.863)\times10^{-5}(\mathrm{kg})\times\{3\times10^{8}(\mathrm{m/sec})\}^{2}=1.677\times10^{12}\text{ ジュール}$$

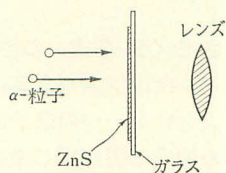
となる。これを原子核1個あたりに直し電子ボルトであらわせば$Q=17.35$ MeV となる（第3章§4参照）。これらの Q-値を化学反応式と同じような形で書くと，

$$\left.\begin{array}{l}{}^{7}_{3}\mathrm{Li}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}={}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}+17.35\,\mathrm{MeV}\\ \qquad\text{（1個の原子核あたり）}\\ {}^{7}_{3}\mathrm{Li}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}={}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}+1.677\times10^{12}\text{ ジュール}\\ \qquad\text{（}L\text{個の原子核あたり）}\end{array}\right\}\text{〈5-7式〉}$$

となる。1932年には，原子核反応による Q-値とイオンを電界や磁界で曲げて質量を測定する質量分析器による Q-値をくらべたわけである。しかしエネルギーと質量の関係が証明されたあとでは，原子核反応と〈5-6式〉を使って Q-値を精密に求めて，原子の質量を精密にきめることが行なわれている。実は〔3-1表〕の結果は，大部分は，原子核反応によって精密になったものである。

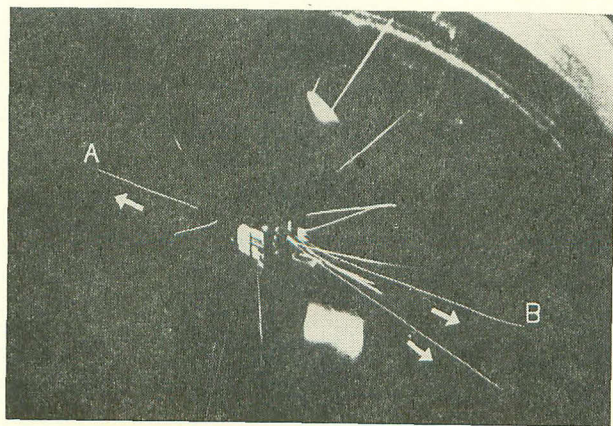
さて〈5-7式〉の結果を見ると，反応のときに出てくるエネルギーは，炭素や水素の燃焼の反応熱にくらべておよそ100万倍も大きい。一つの原子といっても，一つの原子核といっても，実際の物質の量は同じである。同じ分量の物質で，原子の「衣」がからみ合う化学反応を起したときにくらべて，「芯」の原子核が変化する反応，すなわち原子力の反応では100万倍もの大きいエネルギーが出ることになる。原子力がエネルギー源として重大となるもっとも大きい理由がここにある。

「原子力」ということば　ここで「原子力」という，この本の題名でもある言葉について少し反省しておこう。原子の「衣」がか

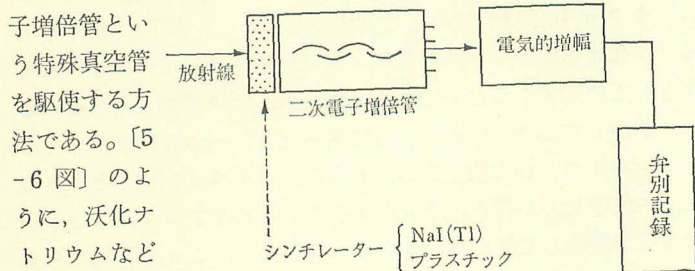
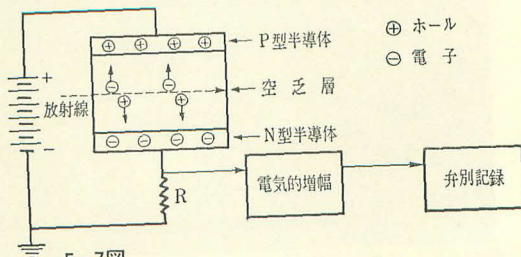
らみ合う化学反応も「芯」が関係する反応も，原子の一部分で行なわれる反応であるから，ともに原子反応とよぶことができよう。しかし区別するならば，炭素や水素の燃焼は原子反応で，リシウム７の人工変換は原子核反応である。つまり，炭素や水素の燃焼のエネルギーを「原子エネルギー」とよび，リシウム７などの変換によるエネルギーを「核エネルギー」とよぶべきである。この意味では原子爆弾 (Atomic Bomb) も米国の AEC (Atomic Energy Comission＝直訳すれば「原子エネルギー委員会」) も，「原子」という言葉を使った点で物理学的にはおかしい。そこで最近は核エネルギーとか核爆弾とか核爆発禁止とか言うようになっている。日本語の「原子力」は「原子」のほかにもうひとつ誤りを含んでいる。「力」と「エネルギー」とは物理学的には異なるものだからである。はじめから「核エネルギー」とか「核エネルギー委員会」とすればよかったのにと，悔まれることである。

粒子の観測　原子核反応〈1－2 式〉において，いったい出てくる α-粒子を観測する，つまりわれわれの感覚でとらえるのにはどうするのかという疑問と興味を持たれるであろう。粒子の観測手段は，反応を起す装置とともに大切なもので，実験物理学者はいつもこれに気をつかっている。コッククロフトらが 1932 年にこの実験に成功したときには〔5－4 図〕のようなシンチレーションの方法を使った。α-粒子が硫化亜鉛 (ZnS) の膜に衝突したときに出る光をレンズを通して直接に眼で見るのである。光はわずかであるから，部屋をまっ暗にして注意して観測する。この方法はラザフォードが 1919 年に，ラジウムのような放射性物質から出てくる α-粒子を窒素にうちつけてはじめて原子核の人工変換に成功したときにも使われたことは第１章で述べた。この方法でも，あとから述べる

5－4図
シンチレーションの方法

多くの進歩した方法でも，とにかく，原子核という粒子としてはひどく小さくて軽いものを一つ一つ数えるのであるから驚くべきことである。ただし原子核が止っている場合は，何とも数える方法はないのであって，相当の速さ，つまり運動のエネルギーを持っているときに検出することができるわけである。そのエネルギーによって物質の中の原子の秩序を乱し，そのあとの発光をとらえるのがシンチレーションの方法である。

α-粒子のようなものを検出する方法はその後大きく進歩している。まずα-粒子は空気などの気体の中を走ると原子に衝突してイオン化する。イオンは電界によって移動するので，わずかな電流として測定することができる。たくさんのα-粒子が作るイオンを平均してふつうの電流として測ったり，一つの粒子が作るイオンをパルスとして数える方法もある。ウイルソン霧箱というのは，α-粒子などが作るイオンを中心として水やアルコールの過飽和蒸気が凝縮して眼に見える小さい粒となり，これを写真にとる方法である。〔5-5図〕はこの写真で，〈1-2式〉反応でとび出

5-5図　$^7_3$Li と陽子の反応から出た二つのα-粒子。AとBが対になって出ている。

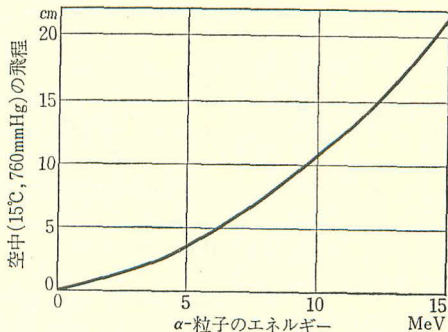
す二つの α-粒子が同時に観測されるようにくふうしたものである。このときには，〈5-6式〉について述べたように，反応を起す陽子のエネルギー E_a が，とび出す α-粒子のエネルギー E_b にくらべて小さいので，近似的に見ると二つの α-粒子が Q の半分ずつのエネルギーを持ってとび出し，しかもその方向は互いに反対になっている。図の矢印がそれを示している。

これらの観測方法はその後さらに2段の大きい進歩をみた。その一つは，やはりシンチレーションを使うものであるが，二次電子増倍管という特殊真空管を駆使する方法である。〔5-6図〕のように，沃化ナトリウムなどの特殊結晶に α-粒子などの放射線があたると発光するのを利用して，二次電子増倍管の中でまず光電効果によって光が電子に変り，この電子が二次電子を出すいくつかの表面に衝突することによって1万倍から10万倍に増倍される。このパルスは，その大きさがしらべられ，また数が記録される。この方法は1950年頃から発達したもので，こ

5-6図　シンチレーション計数管

5-7図
放射線が半導体の中に作る電子とホールをあつめる

れによって検出の能率と精度は格段とよくなった。

もう一段の進歩は1960年頃からはじまったもので，トランジスターなどに広く応用されている半導体を使う。〔5-7図〕のように，P型，N型の間に空乏層とよばれる部分を持つ半導体を用い，P型とN型の間に電圧をかけておく。空乏層の中に放射線が入って，電子と，正の電荷を持つホールをあつめるのである。これは空中に放射線がイオンを作ったものをあつめるのによく似ている。半導体を利用する方法は，粒子を検出するばかりでなく，そのエネルギーも精密に決定することができるところに大きな進歩があり，現在広く使われている。

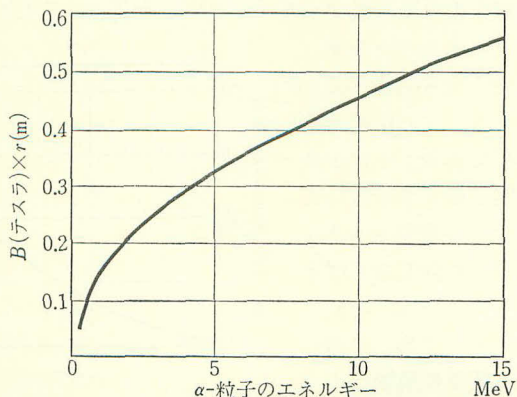
粒子エネルギーの測定　こうして，原子核反応によって出てくる粒子のエネルギーを観測して，反応の Q-値を精密にきめることができるわけだが，それでは粒子のエネルギーをどのようにして測定するのであろうか。ここではその方法について原理的なことがらだけを述べよう。

α-粒子などが物質の中をどれだけ走れるかという距離を「飛程」という。たとえば α-粒子は空中を走りながら空中の酸素や窒素の原子に衝突してエネルギーを失う。そしてある距離を走るとエネルギーをまったく失って止ってしまう。この距離が飛程である。α-粒子や陽子のように重いイオンの飛程はエネルギーが同じならばそろっている。それにくらべてあとで述べる電子の飛程はイオンが軽いためにエネ

5-8図　α-粒子の飛程とエネルギー

ルギーが同じでも不ぞろいである。コッククロフトらは，1932年の実験で，まずこの方法によってエネルギーをきめた。〔5－8図〕は，ふつうの空中での α-粒子の飛程とそのエネルギーの関係を示す図である。これによって，空中を何センチ走る α-粒子のエネルギーはどのくらいかを求めることができる。また，α-粒子がアルミニウムや銅などの箔の中を走って止る飛程からもエネルギーを求めることができる。

エネルギーを決定するために大切なもうひとつの方法は，磁界の中での曲り方を見る方法である。一様な磁界の中に電荷を持つ粒子があり，それが磁界に直角に運動すれば円運動をすることは質量分析器のところで述べた（117ページ）。粒子の質量を M，電荷を q，速さを v，磁界を B（テスラ），円運動の半径を r（m）とすれば，〈3－24式〉と同じように，

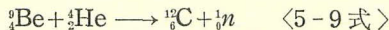
$$\frac{Mv^2}{r} = qvB, \quad Mv = qrB \qquad \langle 5\text{-}8\text{式}\rangle$$

となる。α-粒子を考えるときには M と q はわかっているから，$B \times r$ がわかればこの式によって v がわかる。したがって α-粒子のエネルギーを知ることができる。〔5－9図〕はこれをグラフにしたものである。〔5－8図〕や〔5－9図〕は例を α-粒子にとって作ったグラフであるが，陽子とか，のちに述べる核分裂

5-9図　α-粒子は磁界の中でどんな半径でまがるか

のときの分裂片のような重い原子核のエネルギーを決定するためにもやはりここで述べた方法が適用される。

§2　重陽子と重陽子の衝突

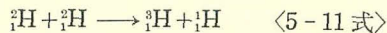
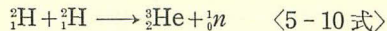
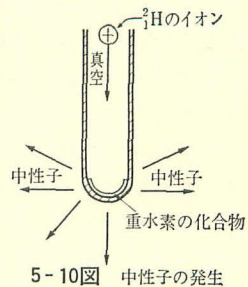
中性子の発生　中性子はベリリウムを α-粒子でたたいているときに発見された（第1章§3）。その反応は，

$${}^{9}_{4}\mathrm{Be}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{0}n \qquad \langle 5-9\text{式}\rangle$$

である。中性子を発生する反応はこのほかに非常に多くある。ここでは加速器を用いる場合として，重陽子と重陽子の衝突による中性子の発生をとりあげたい。

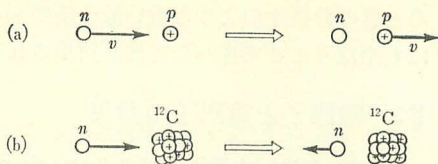
この反応を起すためには〔5-1図〕と同じような装置を使う。〔5-10図〕のように真空の中で加速された ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ のイオンを ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ を含む化合物にうちつける。イオンが 20 keV くらいのエネルギーを持っていると次の二つの反応が起る。

5-10図　中性子の発生

$${}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{3}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}n \qquad \langle 5-10\text{式}\rangle$$

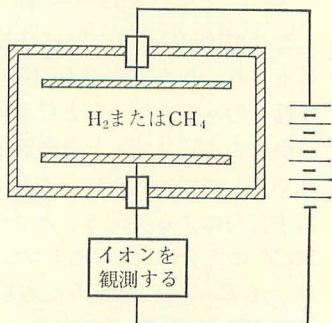
$${}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{3}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \qquad \langle 5-11\text{式}\rangle$$

ここでは〈5-10 式〉の中性子が発生する反応についてだけを考えよう。この反応の Q-値は $Q=3.27$ MeV である。発生する中性子のエネルギーがどのくらいであるかについては，エネルギー保存の〈5-4式〉と運動量保存の〈5-5式〉を反応〈5-10式〉に適用して解けばよい。これによると中性子のエネルギーはとび出す方向によって変る。とび込む ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ イオンのエネルギーが 0.5 MeV のときに，${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ イオンに直角の方向に出る中性子のエネルギーは $E_n=2.57$ MeV であり，${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ イオンの方向に出るもののエネルギーは $E_n=3.51$ MeV である。

検出とエネルギー測定　中性子は電荷を持っていないので，物質

の中を走ってもそのままでは原子をイオン化することはない。しかし，中性子は原子核に衝突すれば，これをつきとばしてエネルギーを与える。〔5-11図〕はその例を示したもので，(a) 図は中性子が陽子に衝突するときである。正面衝突をするとは限らないが，図では正面衝突の場合を考えている。中性子と陽子とはほとんど質量が同じであるから，玉突きの玉の衝突からもわかるように，正面衝突では中性子は止ってエネルギーを失い，陽子が中性子の持っていたエネルギーで動き出す。この陽子は気体などの原子をイオン化するので，これによって中性子の存在を知ることができる。(b) のように中性子が中性子よりはるかに質量の大きい $^{12}_{6}C$ の原子核に衝突したとしよう。このときは正面衝突をしても中性子ははねかえって，その一部のエネルギーを $^{12}_{6}C$ に与えるだけである。

(a) n → v p ⇒ n p → v

(b) n → ^{12}C ⇒ ← n ^{12}C

5-11図 中性子が正面衝突するとき

中性子を検出する装置の一例が〔5-12図〕である。イオンを集めるイオン化槽の中に水素または水素を含むメタンなどの気体を入れ，電極に電圧をかけておく。中性子がとびこんできて水素の中の陽子を突きとばすと，イオン電流が流れる。イオンができたときにパルスとして観測すると，パルスの大きさから陽子の作ったイオンの分量を知り，それによって陽子のエネルギーを知ることができる。

5-12図
中性子の検出とエネルギー測定

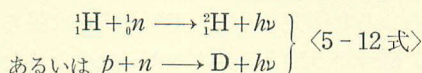
中性子のエネルギーを知るためには次のようにする。中性子は陽子といろいろな衝突をして，正面衝突とは限らない。正面衝突でないと，陽子がうけとるエネルギーは少なくなる。したがって陽子のエネルギーが最大の場合に正面衝突が起っているのであり，それによって中性子のエネルギーを知ることができる。ただし，ここで述べたのは，次に述べる速い中性子と遅い中性子の区別からすれば速い中性子の検出についてである。遅い中性子はカドミウムやホウ素に異常に激しく吸収されるので，それを利用して検出することができる。

速い中性子と遅い中性子　陽子などに衝突した中性子は，〔5-11図〕の (a) のような正面衝突をすると一度にそのエネルギーを失う。正面衝突でなかったり，(b) 図のような重い原子核との衝突であっても，繰りかえし衝突すれば，そのエネルギーをだんだんと失っていく。つまり減速されていく。しかし中性子がまったくそのエネルギーを失ってしまうかというと，問題がある。すべての原子核は，気体であっても固体の格子であっても，みんな熱運動をしているからである。中性子のエネルギーが仮りにこの熱運動のエネルギーより小さくなったとすると，衝突された原子核からエネルギーをもらうことになるから，中性子のエネルギーは原子核の熱運動のエネルギーより小さくはならない。この熱運動のエネルギーは第3章 §5 で述べたように約 0.024 eV である。原子核と衝突を繰りかえしてその平均のエネルギーがこの熱運動のエネルギーになったものを「遅い中性子」，あるいは「熱中性子」とよび，これに対して減速される前の中性子を「速い中性子」とよぶ。

§3　陽子と中性子の結合反応

次にとりあげたい原子核反応の例は陽子と中性子の結合反応である。この反応は陽子が中性子と結合して重陽子となり，結合エ

ネルギーをγ-線として放出するものである。反応式で書けば,

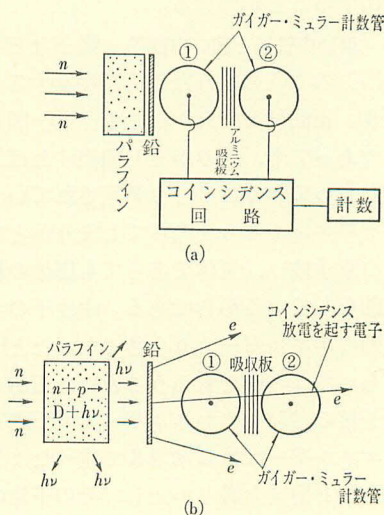
$$\left.\begin{array}{r} {}^1_1\mathrm{H}+{}^1_0n \longrightarrow {}^2_1\mathrm{H}+h\nu \\ \text{あるいは}\ p+n \longrightarrow \mathrm{D}+h\nu \end{array}\right\} \langle 5-12\text{式}\rangle$$

となる。$h\nu$ は γ-線をあらわしていて, hはプランクの常数, ν はこの電磁波の振動数である。νは非常に大きく光量子 $h\nu$ のエネルギーは 2 MeV に近いものになっている。これは γ-線の量子エネルギー, または単にエネルギーとよばれている。

この反応を起すにはどのようにするのだろうか。〔5-13図〕のように, 陽子を多量に含むパラフィンなどに中性子をあてる。中性子はいろいろの方法で作るが, その一例は, 重陽子と重陽子の衝突による〈5-10式〉の反応を用いるものである。こうして生まれた中性子は相当のエネルギーを持っているので, そのままでは陽子と結合しにくい。原子炉の中の中性子が減速材の中の原子核と衝突してエネルギーを失うことは第1章 §8で述べたが, 同じようにここでも中性子はパラフィンの中の水素や炭素に衝突してエネルギーを失い, 遅い中性子となってから陽子と結合する。しかしこれは言葉の上だけで, 重陽子がほんとうにできたか, あるいはγ-線が出ているかを確認する必要がある。〔5-13図〕では γ-線を検出する方法をとっている。

(a)

(b)

5-13図　γ-線のエネルギーを測る

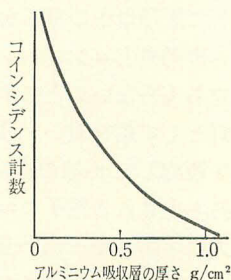
とはいうものの γ-線は電磁波といって電波の一種であって, そ

のままではわれわれの感覚に訴えるものを持っていない。電波ならばアンテナの中の電子を動かして，その結果としてラジオなどに感ずる。γ-線の振動数は非常に大きくて，これに感ずるラジオはない。しかし幸いなことに，γ-線の光量子はエネルギーの粒として原子の中の電子を打ち出す作用がある。打ち出す作用には，光電効果とコンプトン効果があるのだが，ここではその説明には立ち入らないことにする。〔5-13図〕では電子をたくさん含む物質として鉛を使い，(b)に示すようにγ-線が鉛から打ち出す電子を観測してγ-線の存在を知ろうというのである。γ-線によって打ち出される電子のエネルギーにはいろいろある。しかしその最大のエネルギーはγ-線のエネルギーに一致している。

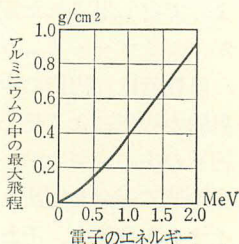
γ-線の観測とエネルギー測定　〔5-13図〕はまた，γ-線を観測すると同時に，そのエネルギーを決める方法を示している。γ-線によって打ち出された電子を観測するのには，やや古い方法であるが，ガイガー・ミュラー計数管を使っている。ガイガー・ミュラー計数管は，円筒の中心に細い針金を張ったもので，いまでも放射線の観測によく使われるガイガー計数管によく似たものである。円筒の中の空気を除いて減圧したアルゴンなどを入れ，円筒と針金の間に適当な電圧をかけておく。電子などが円筒の中に入ってイオンを作ると，それがきっかけになってきわめて小さな放電が起る。これをエレクトロニクスによって増幅して観測する。

計数管が一つでは電子がどの方向からきたかわからないので，計数管を二つ使う。二つの計数管が同時に放電を起せば，(b)のように電子が二つの計数管を貫いたことがたしかであるから，電子が走った方向が狭い範囲に限定される。

このように二つの計数管が同時に放電したかどうかをエレクトロニクスによって知る回路をコインシデンス回路という。コインシデンスしたものを計数するのであるが，その詳細についてはふれないが，原子核物理学では，このような回路に，最先端のエレ

クトロニクスを多量に用いることだけを述べておきたい。

さて，この実験での電子のエネルギーは，電子が物質の中をどのくらい貫くかによって知ることができる。二つの計数管の間にたとえばアルミニウムの吸収板を入れると，その中で止ってしまう電子があるために，〔5-14図〕に示すようにコインシデンス計数は減少していく。これは，電子が必ずしも一様なエネルギーでないのと，同じエネルギーでも，電子が物質の中を走る飛程は電子によって異なるからである。さまざまな飛程のうち最大の飛程が電子のエネルギーを示してくれる。

5-14図

最大の飛程と電子のエネルギーの関係は〔5-15図〕に示す通りであるから，実験の計数管の壁の厚さ，吸収板の厚さを加えたものとから電子のエネルギーが決定でき，したがってγ-線のエネルギーを知ることができる。この方法によって決められた反応〈5-12式〉の $h\nu$ は $h\nu \fallingdotseq 2.2\,\mathrm{MeV}$ であった。

5-15図

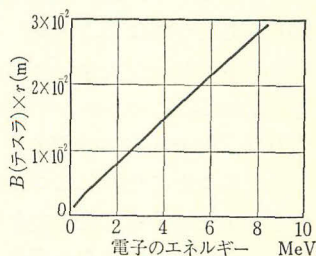
γ-線が打ち出した電子を用いてのγ-線のエネルギーの決定は，〔5-6図〕のシンチレーションの方法によればずっと正確になる。さらに現在では〔5-7図〕のような半導体を利用する方法によって非常に精密に実行できるようになっている。

いろいろな方法で正確にきめられた陽子と中性子の結合エネルギーは 2.23 MeV とされている。これはもちろん〔3-1表〕によって，$^{1}_{1}\mathrm{H}$ と n の質量の和から $^{2}_{1}\mathrm{H}$(D) の質量を引き算したものをエネルギーに換算したものに等しい。

陽子と中性子の結合反応をエネルギーについて書くと，

$$\left.\begin{array}{l} {}^1_1\mathrm{H}+{}^1_0n={}^2_1\mathrm{H}+2.23\ \mathrm{MeV} \\ \qquad\text{（1個の原子核あたり）} \\ {}^1_1\mathrm{H}+{}^1_0n={}^2_1\mathrm{H}+2.14\times10^{11}\ \text{ジュール} \\ \qquad\text{（}L\text{個の原子核あたり）} \end{array}\right\}\ \langle 5-13\text{式}\rangle$$

となる。

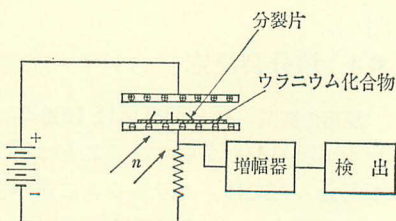
電子のエネルギーはまた，磁界（Bテスラ）の中でどんな半径（rメートル）の円運動をするかによっても決定できる。〔5-16図〕は電子のエネルギーと$B\times r$の関係を示したものである。

5-16図　電子のエネルギーと$B\times r$

§4　核分裂反応

反応の観測　核分裂反応は1939年にドイツのハーンとストラスマンが発見したものであることは第1章 §7 で述べた。ハーンらが行なったのは，ウラニウムに熱中性子をあてたときに出てくる放射性同位元素の研究であった。この同位元素の中にバリウムと化学的に似ているもので半減期（159ページ参照）が83分のものがあった。バリウムと化学的に同じであるといってもそれがバリウムとは限らない。周期表のアルカリ土類ならば同じ性質を示すわけで，ラジウムの同位元素かもしれない。ハーンらはこれに対して，放射線の測定と化学処理の技術を高度に駆使して，半減期が83分のものはバリウム自身であることをたしかめたのである。これによると${}^{139}_{56}\mathrm{Ba}$が存在するわけで，${}^{235}\mathrm{U}$または${}^{238}\mathrm{U}$から質量数が139のものができたのである。つまり原子核が大福餅をちぎるように分裂したわけで，これが核分裂反応の発見である。

このように，核分裂はまず化学的方法によってたしかめられた。

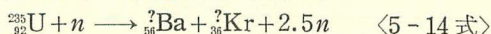
しかし，それならば，大福餅のかたわれ，つまり分裂片を物理的方法によって観測できるはずである。この分裂片は相当のエネルギーを持っているであろう。というのはウラニウムでは，原子核の結合エネルギーを示す〔3-41図〕でわかるように，核子あたりの結合エネルギーは 7.5 MeV であり，バリウムなどの質量数が 140 のあたりでは 8.3 MeV くらいである。分裂したものの方が結合エネルギーが大きいので，分裂したときにエネルギーが出ることになる。このエネルギーは核子あたり 8.3−7.5=0.8 MeV であり，核子は約 240 個あるから，およそ 190 MeV のエネルギーが出ることになる。二つの分裂片はこのエネルギーのおよそ半分ずつを受けとって走るであろう。このくらいのエネルギーを持てば，原子の周囲の衣の部分ははぎとられるものが多くなり，イオンとなって空中を走る。

このイオンが走ったところには多くの空気のイオンができるであろう。このイオンの検出は容易なはずである。

5-17図　核分裂片の観測

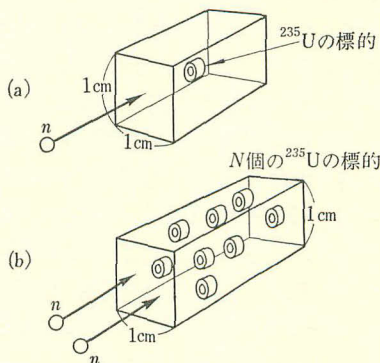
〔5-17図〕のように二つの電極に電圧をかけておき，一方に UO_3 などのウラニウムの化合物を附着させておいて遅い中性子をあてると，核分裂が起る。このときの核分裂片の片方は電極の間に走り出し，片方はウラニウムの化合物の中に向う。電極の間に走り出したものは多量のイオンを作るので，イオンをあつめるときのパルスとして簡単に観測できる。これからイオンの総量を推定し，さらに分裂片のエネルギーを推定できる。その結果は核分裂のときにおよそ 190 MeV のエネルギーが出るという予想と矛盾していなかった。

反応の確率　第1章 §7 で $^{235}_{92}U$ の核分裂について述べた。その

ときの〔1-4図〕の反応は式で書くと，

$$^{235}_{92}U + n \longrightarrow {}^{?}_{56}Ba + {}^{?}_{36}Kr + 2.5n \qquad \langle 5\text{-}14\text{式}\rangle$$

となる。ここでBaやKrの質量数を？としたのは，一種ではないからである。また前にも述べたように，BaとKrのような分れ方も一つばかりでなくこのほかにもいろいろある。

中性子によって核分裂を起すのは ^{235}U に限らない。$^{239}_{94}Pu$, $^{233}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, $^{232}_{90}Th$ も核分裂を起す。このうち熱中性子で特に核分裂をたくさん起すのは $^{235}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$, $^{233}_{92}U$ であり，$^{238}_{92}U$ と $^{232}_{90}Th$ では熱中性子による核分裂は多くは起らない。

ここで反応を起す確率について説明しておきたい。このような場合に確率の大小をあらわすのに「断面積」という言葉をつかう。〔5-18図〕(a)のように断面積が1cm²の筒の中に，この場合 $^{235}_{92}U$ が1個あって，筒のどこにあるかはわからない。これに1個の中性子がとび込むとし，中性子は1cm²の切口のどこに入るかわからないとする。このときに $^{235}_{92}U$ と中性子がぶつかって核分裂を起す確率が σ であれば，σ をこの反応の断面積といい平方センチであらわす。断面積という言葉を使うのは，切口1cm²の中に面積が σ cm²の標的があって，それに球があたると核分裂が起るとするのによく似ているからである。〔5-18図〕(b)のように筒の中に N 個の $^{235}_{92}U$ があり，それぞれ面積 σ の標的を持っていて，これに1個の中性子がとび込んだときに核分裂を起す確率は $N\sigma$ となる。とびこむ中性子が n 個であれば，分裂が起る数は $Nn\sigma$ となる。

5-18図　壊変の断面積

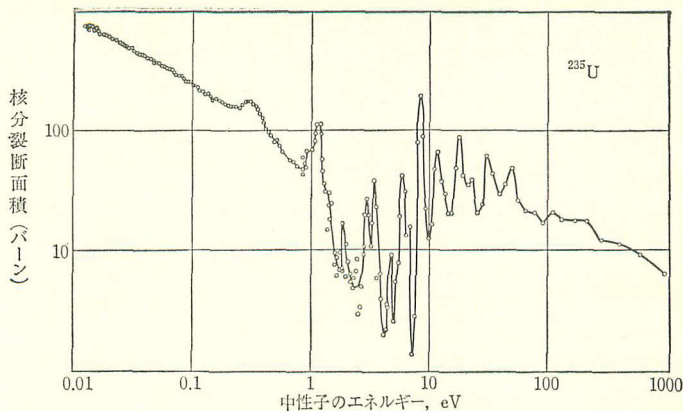
	熱 中 性 子	高速中性子炉の中性子(～0.1MeV)	核分裂中性子(～1.5MeV)
^{235}U	582 バーン	1.6 バーン	1.3 バーン
^{239}Pu	748 バーン	1.8 バーン	1.9 バーン
^{233}U	528 バーン	2.4 バーン	1.9 バーン
^{238}U	<0.01 バーン	0.13 バーン	0.30 バーン
^{232}Th		0.03 バーン	0.07 バーン

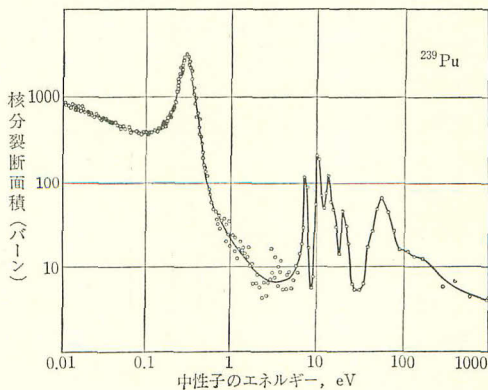
5-1 表 中性子による核分裂の断面積

断面積の考え方は，物騒なたとえでいけないが，森の立ち木に向ってデタラメにピストルを打つときに弾丸が木にあたる確率を考えるのに似ている。木が太くてたくさんあれば，出たらめに打ってもあたる確率は大きくなる。ふつうの物質は詰っているように見えるが，原子や原子核の立場から見ると，すかすかであるから，そのならび方は森の木に似ているわけである。

ある核反応の起る断面積が $\sigma=10^{-24}\text{cm}^2$ であり，切口 1cm^2 の筒の中に 10^{23} 個の原子核があれば，反応が起る確率 p は $p=10^{23}\times10^{-24}=0.1$ となる。つまり 10 個の粒子がとび込むと一つの核反応が起ることになる。断面積の考え方は核分裂だけでなく一般の原子核反応その他にも使える考え方である。原子核反応では 10^{-24}cm^2 の断面積を単位にすると便利であるから，10^{-24}cm^2 を 1 バーン (bahn) とよぶ。

〔5-1表〕は熱中性子および，およそ 0.1 MeV と 1.5 MeV のエネルギーの中性子による核分裂の断面積を示したものである。上の三つ，^{235}U，^{239}Pu，^{233}U は熱中性子によって特に核分裂を起しやすいために，原子炉の主燃料になっている。中性子のエネルギーが 0.1 MeV あるいは 1.5 MeV のあたりにくらべて，熱中性子では核分裂が何百倍も激しく起る。下段の二つ，^{238}U，^{232}Th では熱中性子による核分裂は非常に少ない。速い中性子による核分裂は認められるが，やはり上段の三種類よりも少ない。

原子炉を設計するときには，核分裂の断面積について，さらに

5-19図　^{235}Uの分裂断面積と中性子のエネルギー

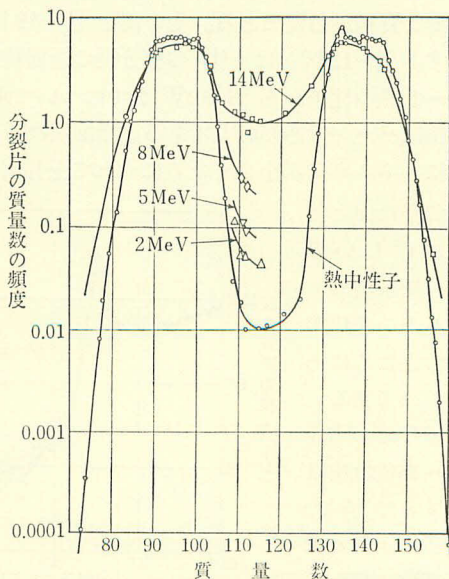
精密な資料が必要である。その例を〔5-19図〕と〔5-20図〕に示す。〔5-19図〕は ^{235}U の核分裂の断面積を，中性子のエネルギーを熱中性子から1000 eV までについて求めたものである。縦軸はバーンであらわしてある。断面積は 1 eV 以下では図のようにエネルギーが小さくなるにつれて上昇している。1 eV 以上で曲線に山と谷がはげしいのは，原子核のエネルギー準位が山のところにあるためである。原子核のエネルギー準位は第3章§8で述べた原子のエネルギー準位に似たものであって，量

5-20図　^{239}Puの分裂断面積と中性子のエネルギー

子力学によって理解できるものである。

〔5-20図〕は ^{239}Pu について分裂断面積と中性子エネルギーの関係を示したものである。およそのことは ^{235}U のときと同じであるが，1eV 以下に大きな山があることが目立つ。ここに原子核のエネルギー準位があるからである。

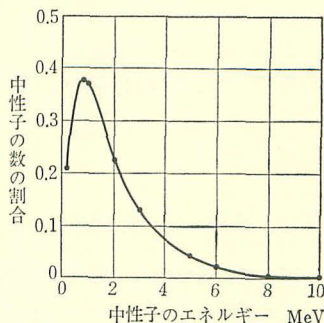
核分裂反応によるエネルギー　核分裂反応は核エネルギーを利用するために重要な反応である。どんなことが起っているかをもう少しくわしく考え，発生するエネルギーについて考えてみよう。

大福餅を二つにちぎるように分裂するといってきたが，分裂片の大きさはどうなっているだろうか。〔5-21図〕は ^{235}U の分裂片の質量数の統計分布を示している。これでわかるようにちょうど半分にちぎれるのでなく，質量数 140 と 95 のあたりに分布の山がある。この山の間の谷の深さは，分裂を起す中性子のエネルギーによって図のように変っている。

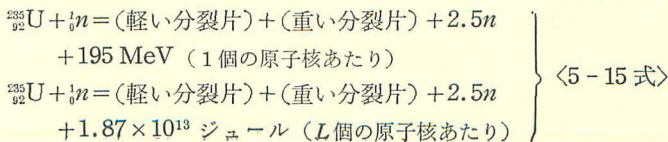
〔5-22図〕はやはり ^{235}U の分裂片の持つエネルギーの統計分布である。〔5-21図〕のように，片ちんばに分裂するために，分裂片のエネルギーも二つの山に分れてあつまるような形になって

5-21図　^{235}Uの核分裂片の大きさの分布

5-22図　^{235}Uの分裂片の持つエネルギー分布

いる。一つの山は68 MeVに，もう一つの山は99 MeVにある。

核分裂のときに出る中性子の検出計数とエネルギーの決定はさきに§2で述べた方法によって行なわれる。〔5-23図〕はその結果で，^{235}Uが熱中性子によって核分裂したときに発生する中性子のエネルギー分布である。山は1 MeVの近くにあり，エネルギーが大きくなるとどんどん減りながら10 MeVの近くまで分布している。核分裂のときには，中性子のほかに，電子（β-線）やγ-線も出る。この検出とエネルギー決定は本章§3で述べたようにすればよい。

5-23図　^{235}Uの核分裂による中性子のエネルギー分布

核分裂によって発生するエネルギーをこのようにして決めたものを〔5-2表〕に示す。^{235}U，^{239}Pu，^{233}Uが熱中性子によって核分裂を起したときのものである。^{235}Uについての反応式は，

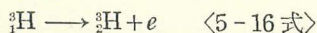
$$\left.\begin{aligned} &{}^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}n=(\text{軽い分裂片})+(\text{重い分裂片})+2.5n \\ &\qquad +195\ \mathrm{MeV}\ (\text{1個の原子核あたり}) \\ &{}^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}n=(\text{軽い分裂片})+(\text{重い分裂片})+2.5n \\ &\qquad +1.87\times10^{13}\ \text{ジュール}\ (L\text{個の原子核あたり}) \end{aligned}\right\}\ \langle 5-15\ \text{式}\rangle$$

核分裂生成物	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U
軽い分裂片	100MeV	102MeV	100
重い分裂片	68	73	68
中性子	4.8	5.8	5.0
速発 γ-線	7.5	~7	~7
遅発 γ-線	6.8	~6.2	~4.2
β-線	7.8	~8	~8
全反応エネルギー	195	202	192

5-2 表　核分裂のエネルギー

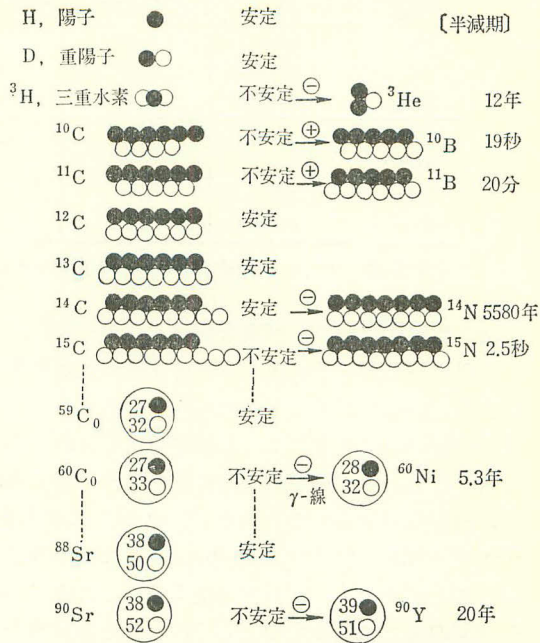
となる。これが核分裂を利用するときのエネルギーを計算する基本式である。このあとの式は $L=6.02\times10^{23}$ 個の $^{235}_{92}U$ が核分裂を起したときのエネルギーである。一般にある原子または原子核がL個あつまった質量を1モルという。^{235}U の1モルは 235 g である。これだけの分量の ^{235}U が核分裂を起すと 1.87×10^{13} ジュールのエネルギーが発生する。これを kWh にすれば 5.2×10^{6} kWh となる。

§5　放射性同位元素を作る

不安定から安定へ　原子力の利用を行なうときには，放射性同位元素の問題がつきまとっている。放射性同位元素というのは，第1章 §4で述べた同位元素のうち，原子核の中の中性子の数が多すぎたり少なすぎたりして不安定になって，電子や正の電荷を持つ電子（陽電子）などを放出して安定な同位元素に変化するものである。その代表的なものを〔5-24 図〕に示した。図の上の方に示してある水素の同位元素のうち $^{1}_{1}H$ と $^{2}_{1}H$ は安定であるが，中性子が2個の $^{3}_{1}H$ は不安定で電子を出して $^{3}_{2}He$ になる。式で書くと次のようになる。

$$^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}H + e \qquad \langle 5\text{-}16\,式\rangle$$

半減期12年

このときに出てくる電子のエネルギーは不均一であるが最大 0.02 MeV である。

原子核が不安定といっても，変化が速く起るものもあるし，ゆっくり起るものもある。その速さを半減期 T であらわす。N 個の $^3_1$H があったときに半減期 T の間にその半分の $N/2$ が変化して $^3_2$He になり，残り半分が $^3_1$H として残る。そのあと半減期だけ経過すると $N/2$ 個の $^3_1$H のうちさらに半分が $^3_2$He に変化する。これを繰り返していくのである。$^3_1$H の場合には半減期は 12 年である。もう一つの例をあげると，炭素では $^{12}_6$C と $^{13}_6$C は安定であるが，中性子の一つ少ない $^{11}_6$C は不安定で陽電子を出し，半減期 20 分で $^{11}_5$B となる。中性子が一つ多い $^{14}_6$C は電子を出し，半減期 5580 年で $^{14}_7$N となる。

5 - 24 図　放射性同位元素の例

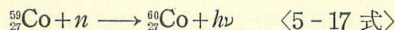
核分裂のときには，〔5 - 21 図〕のようにいろいろな分裂片ができるが，この中であるものは人工放射性同位元素である。分裂片が放射性で，β 崩壊をして新しい同位元素になっても，それがふ

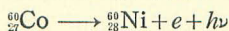
放射性同位元素	半減期	β-線最大エネルギー (MeV)	γ-線 (MeV)
$^{90}_{38}Sr$	28年	0.55	なし
$^{91}_{38}Sr$	9.7時間	2.67	0.6～1.0
$^{99}_{42}Mo$	6.7時間	1.23	0.04～0.7
$^{135}_{53}I$	6.75日	1.4	0.42～1.80
$^{133}_{54}Xe$	5.65日	0.35	～0.1
$^{137}_{55}Cs$	30年	1.2	0.7
$^{143}_{58}Ce$	33.4時間	1.4	0.06～1.10

5-3 表　ウラニウムの核分裂でできる放射性同位元素の例

たたび放射性であり，崩壊を続けるものが多い。このように一つの分裂片から次々と崩壊する放射性同位元素を数えると 200 種に達する。核爆発があるとこれらのものがばらまかれ，また原子力発電の炉の中に生まれてくるわけである。数多くある放射性同位元素のうち，半減期があまりに短いもの，あまりに長いものを除き，放射性の強いものの例を〔5-3表〕に示した。この中でも ^{90}Sr と ^{137}Cs は半減期が 28 年と 30 年で，年月が経過しても弱くなることが少なく，また放射性も強い。この二つは核爆発や原子炉運転のあとに残るものとして，われわれが関心を持たねばならないものである。

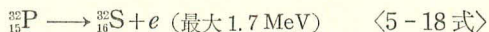
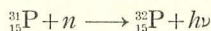
原子炉の中で　原子力の利用のときにエネルギー利用だけでなく放射性同位元素も問題になるのは，原子炉の中では中性子の働きによって放射性同位元素が作られるからである。たとえば原子炉の中にコバルトを置けば，安定な同位元素 $^{59}_{27}Co$ は次の反応によって $^{60}_{27}Co$ になる。

$$^{59}_{27}Co + n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + h\nu \qquad \langle 5-17 \text{式} \rangle$$

この反応を「捕獲反応」といい，中性子が結合され余分のエネルギーは γ-線として放出される。$^{60}_{27}Co$ は放射性であって，半減期 5.3 年で，次の反応によって β-線（電子）と γ-線を出す。

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + e + h\nu$$

原子炉を使うと多量の $^{60}_{27}Co$ を作ることができるので，γ-線の線源として利用されている。

中性子の捕獲反応の例をさらにあげておこう。

$$^{31}_{15}P+n \longrightarrow {}^{32}_{15}P+h\nu$$

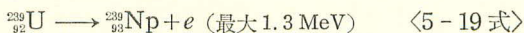
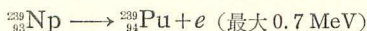
$$^{32}_{15}P \longrightarrow {}^{32}_{16}S+e \text{（最大 1.7 MeV）} \qquad \langle 5-18\text{式}\rangle$$

半減期 15日

もう一つの例をあげると，原子炉の中で，熱中性子では核分裂を起さない $^{238}_{92}U$ が，中性子を捕獲する反応がある。

$$^{238}_{92}U+n \longrightarrow {}^{239}_{92}U+h\nu$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow {}^{239}_{93}Np+e \text{（最大 1.3 MeV）} \qquad \langle 5-19\text{式}\rangle$$

半減期 23.5 分

$$^{239}_{93}Np \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu+e \text{（最大 0.7 MeV）}$$

半減期 2.3 日

核分裂を起す性質を持っているプルトニウムはこのようにして作られる。

これらの例では，中性子の捕獲反応のあとではみんな放射性同位元素となっているが，安定な原子核ができることもある。

第6章　核分裂反応の利用

§1　連鎖反応を起す

核分裂反応を利用すれば，原子核反応の連鎖反応を起すことができることを第1章で述べ，そのあと，原子核や中性子について知識をひろげてきたから，この連鎖反応について，ここでさらに立ち入って考えることができる。むかしから利用され，われわれの生活に深い関係のある燃焼や爆発における連鎖反応についても第4章で述べたが，これらのことについては細かいことは未だわからないことが多いというのが実情で，むしろ後世になって人間が起すことに成功した原子核分裂による連鎖反応の方がより定量的に分析することに成功しているのである。

中性子の数　核分裂によって連鎖反応が可能なのは，1個の中性子が起した核分裂によって1個より多く，すなわち平均で2.5個くらいの中性子が出てくるためである。核分裂を起すいろいろな原子核について，出てくる中性子の数を示したものが〔6-1表〕である。分裂を起す中性子のエネルギーが変化したときにどうなるかも示してある。$\bar{\nu}$は一つの核分裂によって出てくる中性子の平均の数，αは中性子が原子核による捕獲反応によって失われる断面積σ_cと，核分裂を起す断面積σ_fの比である。ηは核燃料の中でとにかく1個の中性子が失われたときに出てくる中性子の数の平均である。

中性子が核燃料の原子核に衝突して失われる断面積は$(\sigma_f+\sigma_c)$であり，その中で分裂を起す断面積はσ_fであるから，ηは，

		$\bar{\nu}$	α	η
熱中性子によるもの	^{235}U	2.43	0.17	2.07
	^{239}Pu	2.87	0.38	2.05
	^{233}U	2.48	0.09	2.26
高速中性子炉の中性子(～0.1MeV)によるもの	^{235}U	2.50	0.19	2.10
	^{239}Pu	2.88	0.18	2.45
	^{233}U	2.51	0.05	2.31
	^{238}U	2.66	～1	～1.3
	^{232}Th	2.36	～0.2	～2.0
核分裂中性子(～1.5MeV)によるもの	^{235}U	2.57	0.09	2.36
	^{239}Pu	3.09	0.04	2.95
	^{233}U	2.62	0.04	2.51
	^{238}U	2.79	～0.3	～2.1
	^{232}Th	2.44	～1	～1.2

$\bar{\nu}$＝1個の核分裂によって出る中性子

α＝中性子が単に捕獲される断面積と核分裂断面積の比

η＝中性子1個が吸収されたとき出る中性子の数の平均値＝$\frac{\bar{\nu}}{1+\alpha}$

6-1表　核分裂によって出る中性子の数

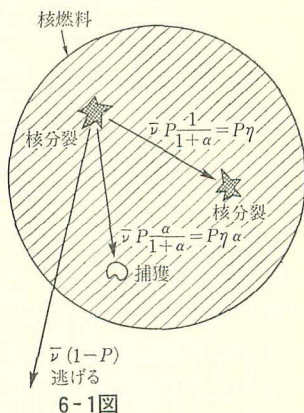
$$\eta=\bar{\nu}\frac{\sigma_f}{\sigma_f+\sigma_c}=\frac{\bar{\nu}}{1+\alpha}\qquad\langle 6\text{-}1\text{式}\rangle$$

となっている。

^{235}U が熱中性子によって分裂するときには $\bar{\nu}=2.43$ であるが，これをいままでおよそ2.5個くらいの中性子が出るといってきたのである。1個の熱中性子が ^{235}U に吸収されたときに出てくる中性子の数は捕獲反応があるために $\eta=2.07$ になっている。これは純粋の ^{235}U の場合であって，天然のウラニウムでは ^{238}U が大部分であり，これは中性子の捕獲だけやって分裂はほとんど起さないから，実効的な η が小さくなる。またウラニウムの濃縮の度合いによって η は変化する。

中性子のエネルギーが大きくなると，核分裂を起す断面積は〔5-1表〕に見るようにひどく小さくなるが，$\bar{\nu}$ は少しずつ大き

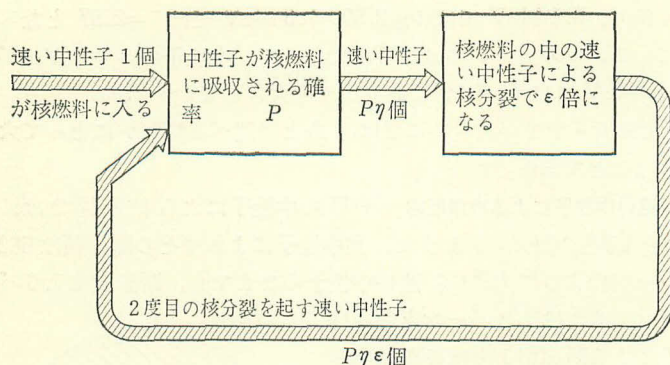
くなり，0.1 MeV では $\bar{\nu}=2.50$，1.5 MeV では $\bar{\nu}=2.57$ となっている。$\bar{\nu}$ の大きいのは ^{239}Pu であって，中性子のエネルギーが 1.5 MeV では $\bar{\nu}=3.09$ であり，η も大きくて $\eta=2.95$ である。^{239}Pu で $\bar{\nu}$ や η が大きいことは，あとで述べる増殖炉にとって大切なことである。

速い中性子による連鎖反応　^{235}U の中性子による核分裂では，〔5-1表〕でわかるように，熱中性子によればその断面積は 582 バーンのように大きい。速い中性子のままでも，断面積は 1.6 バーン，または 1.3 バーンと熱中性子による断面積よりはるかに小さいが，連鎖反応を起すことができる。〔6-1図〕は速い中性子による連鎖反応の図解である。一つの核分裂が起り，平均で $\bar{\nu}$ 個の中性子が出たとする。この中で核燃料の中で原子核に捕獲されるか，核分裂を起すかするものの和を $P\bar{\nu}$ 個とする。つまり $\bar{\nu}\times(1-P)$ 個は核燃料の外に逃げてしまうわけである。

6-1図
速い中性子による連鎖反応

$\bar{\nu}P$ 個の中性子のうち，核分裂を起すものは，

$$\bar{\nu}P\times\frac{\sigma_f}{\sigma_c+\sigma_f}=\bar{\nu}P\frac{1}{1+\alpha}=P\eta$$

個である。さらにこれが速い中性子のままで核燃料の中で核分裂を起して ε 倍になり，核燃料に入っていく速い中性子の数は $P\eta\varepsilon$ 個である。

〔6-1図〕をサイクルで書けば〔6-2図〕のようになる。これによれば，一つの核分裂が起ったときに，それに続いて $P\eta\varepsilon$ 個の核分裂が起ることになる。$P\eta\varepsilon$ を k であらわし「増倍率」とよ

6-2図　速い中性子による連鎖反応

ぶことにしよう。つまり $k=P\eta\varepsilon>1$ ならば，次々と核分裂の数が増していって，連鎖反応になり，$k=P\eta\varepsilon<1$ ならば，反応は1サイクルごとに減少して遂には消えてしまう。つまり k の大小によって連鎖反応が起るかどうかがきまるのである。k の中で η と ε はウラニウムの性質によってきまっているので k を大きくするには P を大きくする。このためには中性子がウラニウムの中で吸収される可能性を大きくする必要がある。そのためにウラニウムの通り道を長くする必要がある。この点から考えると連鎖反応が起るために必要最小限度の大きさがある。この分量を連鎖反応のための「臨界量」という。

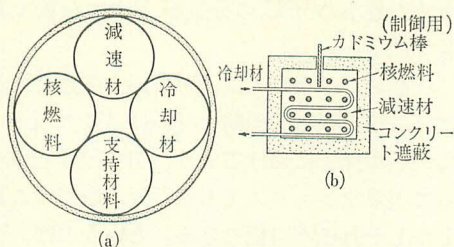
核燃料を球形とし，中性子が走る距離の平均をその半径としよう。いま ^{235}U を用いるとし，〔5-1表〕によって，速い中性子が核分裂を起す断面積 1.3 バーンに〔6-1表〕の $(1+\alpha)$ をかけたものが中性子が吸収される断面積である。またこのエネルギーでは〔6-1表〕によって $\eta=2.36$ であり，ε はほぼ1に近いから $P=1/2.36$ となれば $k\doteqdot1$ となる。第5章§4の方法で $P=1/2.36$ となる長さを計算すると約 6 cm となる。この半径の球の ^{235}U が連鎖反応を起す臨界量の目安となる。核爆発を起す

ための最小の ^{235}U の分量が 10kg 前後であるとされるのはこの計算による。

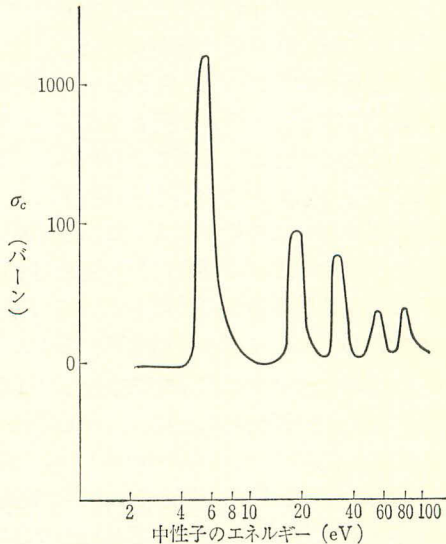
天然のウラニウムは ^{238}U が大部分である。これの速い中性子による核分裂の断面積は〔5-1表〕で見るように ^{235}U の約1/4で，熱中性子におけるような1000倍以上の違いはない。したがって天然ウラニウムでも連鎖反応を起すことができそうに思える。しかしそれは不可能である。というのは，^{238}Uによって吸収も核分裂も起きないが，衝突して散らばる散乱断面積が大きいために核分裂よりも散乱されてエネルギーを失うことが多い。エネルギーを失うと，核分裂の断面積はますます少なくなっていき，しまいにはのちに述べる ^{238}U の共鳴準位に捕獲されてしまう。このようなわけで，速い中性子だけで連鎖反応を起すためにも ^{235}U の濃縮が必要である。

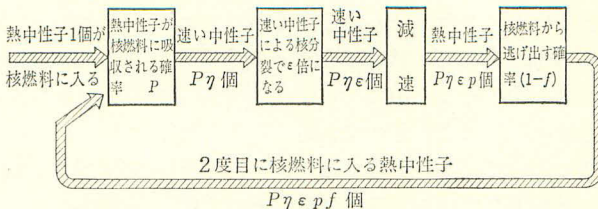
原子爆弾が速い中性子だけの連鎖反応だけで爆発するものならば，ここに述べたことがみんなあてはまるが，原子爆弾のことは発表が少ないのでよくわからない。たとえば，その構造は〔1-7図〕(33ページ) のようであるとするときもある。はなればなれになっている ^{235}U のいくつかのかたまりがあり，この一つ一つは連鎖反応を起すのに小さすぎるものを，火薬の力で一度に近づけると臨界量を越えて爆発を起すという。この図では減速材を使っていないので，もっぱら速い中性子だけで連鎖反応を起すと思える。しかし実際はどうなっているか，小型化，能率化のために減速材を用いているかもしれぬ。事実，そのような文献もある。

熱中性子による連鎖反応　^{235}U や ^{239}Pu の核分裂の断面積は〔5-1 表〕からわかるように熱中性子によると速い中性子の場合の何百倍も大きい。したがって，核分裂によって発生した中性子を減速材で減速して熱中性子としてから次の核分裂を起させるようにすると，原子炉の設計が容易になる。制御もらくにできるようになり，熱をとり出して発電などを行なうことが容易になる。

熱中性子による連鎖反応を起すものを熱中性子原子炉とよぶことにする。この形の原子炉の構造と原理についてはすでに第1章 §8 で述べた。その構成要素をあらためて書くと〔6-3図〕(a)のようになる。核燃料のほかに減速材が必要であり，また，炉の温度が上らないように冷却するとともに熱を外に運び出すための冷却材がある。さらにこれらを支えるための支持材料がある。これらの要素が配列されるありさまの概要を示したものが〔6-3図〕(b)である。核分裂によって核燃料の中で発生した中性子の大部分は減速材の中でエネルギーを失い，熱中性子になってからふたたび核燃料の中で次の核分裂を起す。この間に〔6-3図〕の構成要素の中を通るが，このときにただ減速されるだけで捕獲されることが少ないことが望ましい。つまり中性子が途中で「食べられてしまう」ことは望ましくないのである。

6-3図　熱中性子原子炉の構成

速さの小さくなった中性子を食べて欲しくないのは減速材でも核燃料でもみな同じであるが，核燃料については，一つの大切な問題がある。核燃料として天然のウラニウムを使うと，その99.3%は ^{238}U であり，0.7%が ^{235}U である。^{238}U が速さが小さくなった中性子を捕獲する断面積は〔6-4図〕のようであって，100 eV 以下に大きい共鳴吸収があり，殊に 6 eV の近くには断面積が1000バーンに及ぶ大きい吸収帯がある。もしも衝突によって順々に速さを失っていく中性子の全部が核燃料を通過するとすれば，多くの割合の中性子が ^{238}U に食べられてしまう。しかし，核燃料と減速材の配列を適当にくふうして中性子のエネルギーが

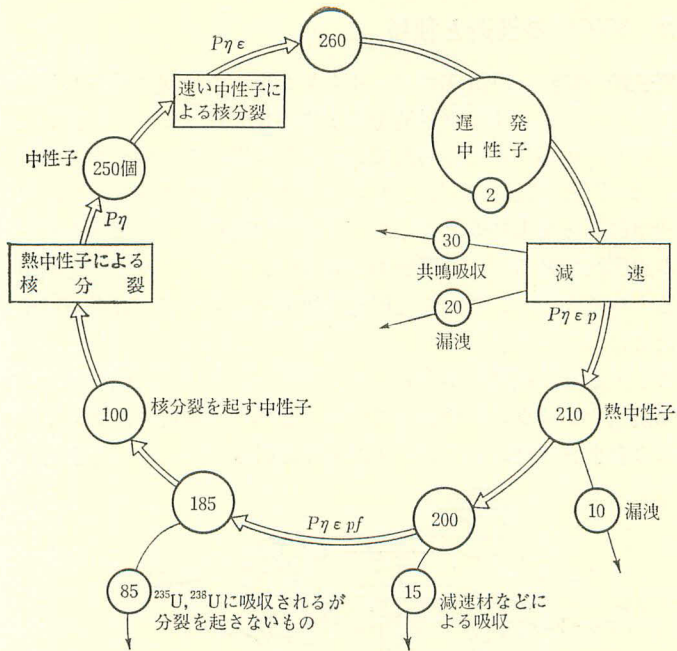
10 eV くらいになったときには，大部分は減速材の中ですごして一部分だけが核燃料の中に滞在するだけとすることができる。このようにして中性子は^{238}U に食べられることなく熱中性子になっていくことができる。

6-4図　^{238}U による中性子捕獲断面積

〔6-5図〕は，分裂によって発生した中性子が次の分裂を起すまでのサイクルを説明したものである。まず熱中性子1個が核燃料に入ったとし，それが核燃料に吸収される確率をPとしよう。吸収には捕獲と核分裂があるから，〈6-1式〉のように吸収のうち$1/(1+\alpha)$が核分裂であり，一つの核分裂あたり$\bar{\nu}$個の速い中性子が出るので吸収された中性子1個あたり$\eta=\bar{\nu}/(1+\alpha)$個の中性子が出ることになる。つまり核燃料に1個の中性子が入ったことに対して$P\eta$個の速い中性子が出る。

6-5図　熱中性子を使う連鎖反応

この速い中性子は核燃料の中を通過するので，この中で核分裂を起して速い中性子の数が多くなる。このために ε 倍になるとすれば中性子の数は $P\eta\varepsilon$ 個となる。これが減速材によって減速され，熱中性子となるが，それまで何かの原子核に捕獲されて食べられてしまう分があるので，食べられることをのがれる確率を p とすると $P\eta\varepsilon p$ 個の熱中性子が生まれる。この中でさらに外部へ逃げ出さないで核燃料に入っていって結局は吸収されるものの割合を f とすると，2回目に核分裂を起す可能性を持って核燃料に入っていく熱中性子の数はかくして $P\eta\varepsilon pf$ 個となる。$P\eta\varepsilon pf$ を k であらわし，やはり「増倍率」とよぶことにしよう。

はじめに核燃料に入った熱中性子は1個であるから，$k=P\eta\varepsilon pf>1$ ならば分裂反応は次第にはげしくなっていき，連鎖反応が爆発的に進行する。$k=P\eta\varepsilon pf=1$ ならば連鎖反応が持続し，$k=P\eta\varepsilon pf<1$ ならば連鎖反応は次第に衰えて消滅する。つまり増倍率 k の大きさが，連鎖反応が可能であるか不可能であるかの分れ目をきめていることになる。

〔6-6図〕は天然ウラニウムを使うときの実際のサイクルの例を示したものである。図は $P\eta\varepsilon pf$ の段階で185個の中性子がある場合を示し，1サイクルのあとで図の $P\eta\varepsilon pf$ のところにふたたび185個の中性子が供給されるサイクルである。

さて185個の中性子のうち85個は分裂を起さないで ^{238}U や ^{235}U に吸収されてしまう。100個が核分裂を起し，250個の速い中性子が出る。これが $P\eta$ の段階である。これが核分裂によって260個（$P\eta\varepsilon$）になる。次に2個の遅発中性子が加わる。これは分裂のあとゆっくりと出てくる中性子であって，このサイクルのずっと前の分裂によるものである。遅発中性子は1サイクルあたり2個であって，多いものではないが，原子炉制御のためには大切な役目を果している。殊に増倍率 k を1に近い値で運転するときに大切な役目を果すことができる。

6-6図 天然ウラニウムと熱中性子を使う連鎖反応が定常になったときの例

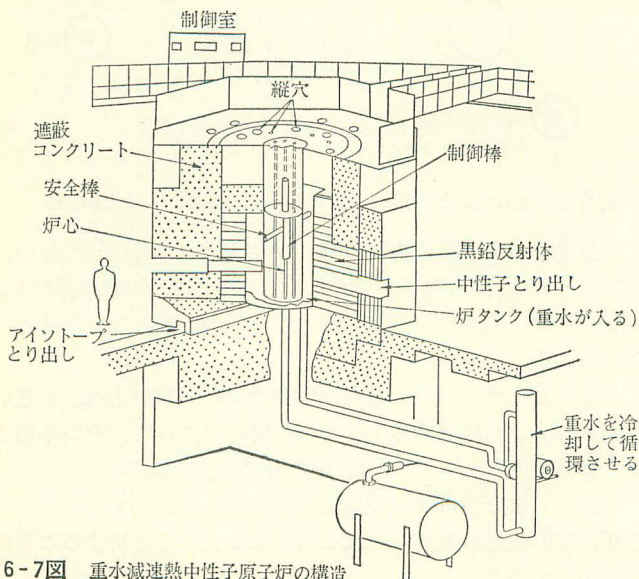
次に減速材の中で減速される間に合計50個の中性子を失い，210個（$P\eta\varepsilon p$）の熱中性子が生まれる。このうち10個は漏洩し，15個はいろいろな材料に吸収され，残りが185個となり，次のサイクルに入る。

このような1サイクルに必要な時間は10^{-3}～10^{-4}秒で，小さいものである。これは熱中性子を用いる場合であって，速い中性子による連鎖反応の1サイクルは10^{-8}秒の程度である。

このように核分裂による連鎖反応はこまかく分析することができるが，化学反応の連鎖反応はこんなにこまかく分析することはできないのである。

§2　原子炉の構造と種類

原子炉の構造　1942年にフェルミがシカゴで最初に動かした原子炉について，およその構造を第1章§8で述べた。その後実に多くの原子炉が世界で作られている。その構造の一例を知るために，〔6-7図〕を見ていただきたい。アメリカのアーゴンヌ国立研究所にあってCP-5とよばれ，重水を減速材として用いる原子炉の説明図である。この原子炉は発電によってエネルギーを利用するものでなく，いろいろな研究に使用するもので，研究用原子炉とよばれている。

まず炉心には核燃料がある。この場合は^{235}Uの割合を大きくした濃縮ウラニウムが使われている。これらは棒状で，アルミニウムの合金またはステインレスのように腐蝕されにくい金属で被

6-7図　重水減速熱中性子原子炉の構造

われ，縦に何本も入っている。そのまわりに減速材としてタンクに入った重水がある。重水タンクのまわりに図のように黒鉛が積み重ねられ，外に向う中性子をはねかえして炉心に向わせ，外に逃げるのをふせぐ。これを反射体とよんでいる。反射体のまわりにはコンクリートの遮蔽があって，放射線が外に洩れないようにしている。

原子炉にとって大切なものは制御棒と安全棒である。図では，上から制御棒が，横から安全棒が差し込まれるようになっている。制御棒や安全棒はカドミウムまたはホウ素を含むもので，熱中性子を強く吸収する働きを持っている。たとえば，カドミウムが熱中性子を吸収する断面積は実に2400バーン，ホウ素では750バーンに達する。この制御棒を深く差し込むと熱中性子が吸収されて〔6-5図〕のpとfが小さくなり，結局kが小さくなって連鎖反応は止ってしまう。制御棒を少しずつ引き抜いていくと，pとfが大きくなり，連鎖反応の度合いが進行していく。連鎖反応の度合いを一定に保つためには，反応によって出てくる中性子の数を検出して自動的に制御棒を上下に動かす。

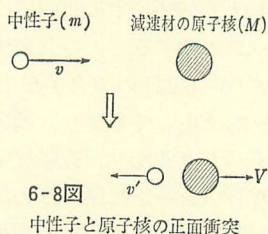
原子炉の温度があまり高くならないように冷却する必要はもちろんある。このためには図のように炉心の下方にある出入口を使って重水を循環させ，下方の熱交換器で冷却して炉心にもどしている。

このような研究用原子炉の目的は，原子炉の中の強い中性子線を利用することである。原子炉の中で中性子はいろいろの方向にとびまわっている。炉の中である方向に向いた単位面積をとって，それを1秒間にとび抜ける中性子の数を「中性子束」といっている。図の原子炉では，中性子束は炉心の近くのもっとも大きいところで$3\times10^{13}/(\mathrm{cm})^2$秒となっている。

この中性子の中に適当な物質を入れると，中性子の捕獲反応によって放射性同位元素を作ることができる。コバルトを入れて，

^{60}Co を作ることはその一例である。〔6-7図〕を見ると放射性同位元素（アイソトープ）をとり出すトンネルが用意されているのがわかる。

また，炉心から水平方向にいくつかの穴がある。これは放射性同位元素を作るためにも使えるが，主としてこの穴からとび出してくる熱中性子を利用するためである。熱中性子はあとで述べるように，物質構造の研究などに利用される。

減速材　中性子が物質の中の原子核と衝突を繰りかえすとだんだんとエネルギーを失っていく。原子炉の減速材はこの現象を利用するわけである。ここで，どんな物質が減速材として適当であるかを考えてみよう。まず減速材の原子核の質量はなるべく中性子に近い方がよい。〔6-8図〕のように中性子（質量 m）と減速材の原子核（質量 M）が正面衝突をしたとしよう。中性子と原子核はいつも正面衝突をするとは限らない。かすめるような衝突の方が多いであろうが，正面衝突の様子を見てエネルギーの失い方を推察することにしよう。中性子が衝突の前に持っていた速さを v とすれば，そのエネルギーは $E_0=(1/2)mv^2$ である。正面衝突のあとで原子核の速さが V，中性子の速さが v' になったとすると，エネルギーの保存，運動量の保存の式を作って計算すると，

6-8図
中性子と原子核の正面衝突

$$V=\frac{2m}{M+m}v$$

となり，原子核のもつエネルギー E は，

$$E=\frac{1}{2}MV^2=\frac{1}{2}M\left(\frac{2m}{M+m}\right)^2v^2$$

となる。この E は中性子の方からみると中性子が失ったエネル

ギーである。失ったエネルギー E と，はじめのエネルギー E_0 の比 E/E_0 は，

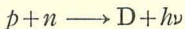
$$\frac{E}{E_0}=\frac{M}{m}\left(\frac{2}{\frac{M}{m}+1}\right)^2$$

となり，M と m が等しければ $E/E_0=1$ で，中性子は1回の正面衝突でそのエネルギーの全部を失うことになる。つまり，陽子に衝突すればもっともエネルギーを失いやすい。

減速材の原子核が重水素であれば $M/m=2$ で $E/E_0\fallingdotseq 0.9$ となり，炭素の原子核ならば $M/m\fallingdotseq 12$ であって $E/E_0\fallingdotseq 0.29$ となる。減速材とはいえないが，^{235}U に正面衝突すると $E/E_0=0.017$ となる。このように，減速材としてはできるだけ軽い原子核を含むものがよい。

減速材としてのさらに大切な性質は，たびたび述べてきたように中性子，殊に熱中性子を吸収することが少ないことである。〔6-2表〕に代表的な元素の原子核が熱中性子を吸収する断面積を示してある。中性子が原子核に衝突して吸収されないで散乱される断面積もいっしょに示した。

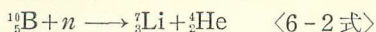
水素による吸収は第5章§3で述べた〈5-12式〉の反応，

$$p+n \longrightarrow D+h\nu$$

である。その他の原子核による吸収はみんなこれと同じような捕獲反応であるが，例外はホウ素であって，これによる強い吸収はホウ素の同位元素のうち ^{10}B によるもので，

	吸収断面積（バーン）	散乱断面積（バーン）
水素	0.33	20～80
重水素	0.00046	5
ホウ素	750	4
炭素	0.0045	5
酸素	0.0002	4
鉄	2.4	11
ニッケル	4.5	18
カドミウム	2400	―
ウラニウム	7.4	8

6-2表　元素の熱中性子に対する吸収と散乱の断面積

次のような原子核反応によっている。

$$^{10}_{5}B + n \longrightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He \qquad \langle 6-2式\rangle$$

〔6-2表〕を見ると，散乱の断面積は元素によってそう大きな開きはないが，吸収の方の断面積にはひどい開きがある。大きい方のチャンピオンのカドミウムと，小さい方の例の酸素のそれでは1000万倍もの違いがある。この事実は，原子核の中にある物理現象の不可思議さとおもしろさをのぞかせているといえる。ひどく大きい吸収断面積を持つ物質と，ひどく小さい物質とがあったので原子炉の制御棒や減速材を設計することができたわけである。核エネルギーの利用を可能にしたのは，核分裂という大切な反応あってのことであるが，物質の原子核のこのような性質がもたらした幸運であったともいうべきであろう。

さて〔6-2表〕で，吸収の大きいものは制御棒に，小さいものは減速材に使われる。減速材としては，原子核の質量数が小さい方が良いので，まず水素が問題になる。水を考えると，酸素は吸収断面積が小さいのでよいが，水素の吸収断面積が問題である。この吸収断面積は0.33バーンで比較的に大きい。これが問題であって，増倍率kの中のpを小さくしてしまう。したがって濃縮ウラニウムを用いてηを大きくしたときに使用することができる。

次に有望なのは重水である。表で見るように重水素も酸素も吸収断面積が小さく，重水素は軽いので理想的な減速材である。ただ，重水はふつう水の中に0.015％しか含まれていないために，分離の費用がかかり，値段が高いのが欠点である。

炭素も減速材としてよく使われる。吸収断面積が小さく，1回の正面衝突で中性子が失うエネルギーは前にも述べたように水素に衝突する場合の$\frac{1}{3}$くらいであるが，何とか使用することができる。しかし，炭素の中にホウ素やカドミウムのような吸収の大きい元素が入りこむことをできるだけ抑える必要がある。

カドミウムやホウ素が異常に強く熱中性子を吸収する性質は制

御棒に使われるほかに熱中性子の検出に利用できる。カドミウムの場合には熱中性子を捕獲してγ-線を出すのでガイガー・ミュラー計数管などでγ-線を検出すればよい。ホウ素の場合には〈6-2式〉の反応でα-線が出てくるからこれを検出する。よく行なわれている方法はガイガー・ミュラー計数管の中に$^{10}BF_3$の気体を入れておき，熱中性子によって出てくるα-線が放電を起すのでこれを検出する。このときにα-線はたくさんのイオンを作るから，計数管の電圧を低くし比例計数管とよばれる範囲で使う。ホウ素を利用するこの検出方法は原子炉の中の中性子の検出などの場合にしばしば使われている。

原子炉の種類　原子炉はその使用目的から，発電用，材料試験用，研究用等に分類できる。一方，中性子のエネルギーとか減速材の選択のような原理的な面からの分類もできる。目的による分類については，あとでそれぞれの目的から原子炉を眺めることにして，ここで原理的な分類方法について述べておこう。

〔6-3表〕は原子炉の原理的分類方法を示したものである。まず原子炉には速い中性子を用いて連鎖反応を行なわせる速中性子炉と，熱中性子を用いる熱中性子炉があることはすでに述べた。熱中性子炉の中には，核燃料として天然ウラニウムを使うか，あるいは^{235}Uの割合を大きくした濃縮ウラニウムを用いるかの区別がある。プルトニウムなどの核分裂物質を使うときの設計は濃縮ウラニウムを使うときに似ている。

減速材の選択については，水を使うことは前にも述べたように

中性子のエネルギーによる区別	核燃料	減速材	冷却材
熱中性子炉	天然ウラニウム	炭素，重水	重水，水，CO_2，空気
	濃縮ウラニウム その他	水，重水，炭素	水
速中性子炉	^{235}U，^{239}Pu	——	Na，K

6-3表　原子炉の原理的分類

天然ウラニウムの場合には不可能であり，濃縮ウラニウムの場合に可能である。冷却材については，天然ウラニウムのときには，水を使うと水素の中性子吸収作用のために連鎖反応が妨げられるので，なるべく使わない。二酸化炭素，空気，重水などが使われるのはそのためである。濃縮ウラニウムの場合には減速材としても水を使うくらいであるから，ほとんどの場合に冷却材としても水を使う。

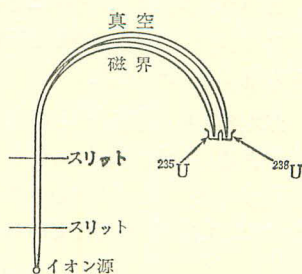
速中性子炉については「増殖炉」の立場からあとで述べるが，この場合には核燃料は ^{235}U または ^{239}Pu の核分裂物質である。そして，中性子のエネルギーの急激な減少をさけるために，減速材を使わないで，冷却材としてナトリウム，カリウム金属などの熔けたものを利用する。

§3　核燃料の濃縮

核燃料の中に核分裂を起す ^{235}U や ^{239}Pu が含まれる濃度が少ないときには，それを材料にして原子炉を運転することは容易でないことを繰りかえし述べた。そこで濃縮する必要が生まれる。濃縮するためには，成分が異なる元素である場合には，いわゆる化学的処理を行なえばよい。つまり酸やアルカリとの反応の違いとか，沈澱のできぐあいなどによって分離できて比較的に容易である。ウラニウムと ^{239}Pu の分離はこのケースである。

しかし，混合しているものが同じ元素である場合には，化学的処理は使えない。このときには，あくまで物理的方法，つまり分子の質量が違うということに頼って分離するより仕方がない。天然ウラニウムの中から ^{235}U を分離するのはこのケースである。ここではこの物理的方法について述べよう。といってもいくつもある物理的方法のうち，実際に行なわれたもの，行なわれているもの，また現在大きく問題にされているものに話題を限ることにする。これから述べる方法がすべてなのではない。

イオンを曲げて分ける　もともと同位体の発見は，原子のイオンを作り，真空の中で磁界や電界で曲げてみたところ，質量に何種類かのものがあることがわかったことからはじまったものである。このための装置の概要については第3章§9で述べた。この方法によって ^{235}U の大量分離を試みるのは当然であろう。

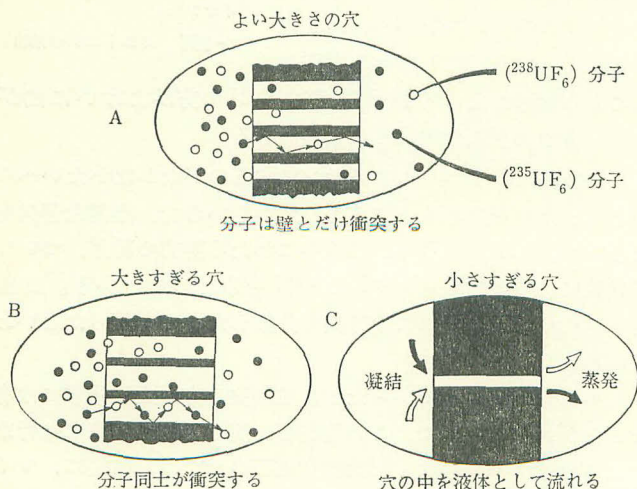
戦時中にアメリカの物理学者や技術者は原子爆弾のためにこの方法で ^{235}U を分離することに大きい努力をはらった。電磁石と真空装置が必要なので，はじめはサイクロトロンの電磁石も流用して実験をはじめ，しまいには非常に大がかりの電磁石をならべて分離を行ない，これをカルトロンと呼んでいた。〔6-9図〕はその原理を示すものである。真空の中でウラニウムのイオンを作り，スリットによって平行にしてから電磁石による磁界によって曲げる。軽い ^{235}U の方がよけいに曲がるから，図のように分離することができる。

6-9図　カルトロンの原理

この方法はウラニウムをイオンにするのがなかなかたいへんなのと，イオンを集めるところもむずかしいので，非常な苦労をしたという。しかし，3年から4年にわたる努力の結果，ついに原子爆弾に必要な数キログラムの ^{235}U を分離したという。広島に投下された原子爆弾はこの方法で分離したものを使ったといわれている。

しかし当時開発中であったガス拡散法の方が大量分離には有利なことがわかったので，この電磁石を使う方法は実際には行なわれなくなり，不要になった大型電磁石の一つは，戦後に，サイクロトロンに転用されたと思われるふしがある。

一方アメリカのオークリッジ研究所では，錫，モリブデン，ニ

ッケルその他の安定同位元素を分離し，純粋の同位体として売り出し，これを世界の原子核物理学者が購入して利用している。原子核物理学からみれば，同じ元素でも質量数が違う同位体はまったく別のものであって，ふつうの元素はこれが混合しているのである。化学の勉強のためには同位体が混合していてもよいが，原子核物理学のためには，分離していることがぜひとも必要である。つまり戦時中にカルトロンによって開発した技術は，原子核物理学という基礎科学の発展に寄与しているわけである。そしてまた同じ技術で作られた ^{235}U が昭和20年に広島の上空で爆発したことも事実なのである。

ガス拡散法　現在 ^{235}U の大量分離に使っている方法はガス拡散法である。拡散法といっても，特殊な物質で作った細孔性隔壁を通過するときに，軽い分子の方が速く通り抜けることを利用するもので，拡散とよばれている物理現象とは少し違う。「細孔通過

6－10図　ガス拡散法の原理

法」といった方がよかったと思う。

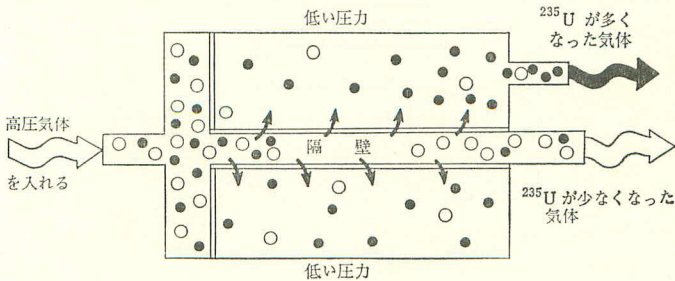
〔6－10図〕はその原理を示したものである。気体は六フッ化ウラニウム（UF_6）を用いる。空気を除いて真空にしてからこの気体を入れる。図のAは穴の大きさが適当な場合で，分子が細孔を通るときに壁とだけ衝突して分子同士は衝突しないようにする。Bのように穴が大きすぎると，穴の中で分子同士の衝突が起って分離能率が悪い。また，Cのように小さすぎると，穴の中で分子は凝結して液体となって，穴を流れるために，分離は起らない。

一般にある温度で質量が M_1 と M_2 の分子が混在しているときには，平均で，二つの分子の運動のエネルギーは等しい。M_1 の方の速さを V_1，M_2 の方のそれを V_2 とすれば，

$$\frac{1}{2}M_1V_1^2 = \frac{1}{2}M_2V_2^2$$

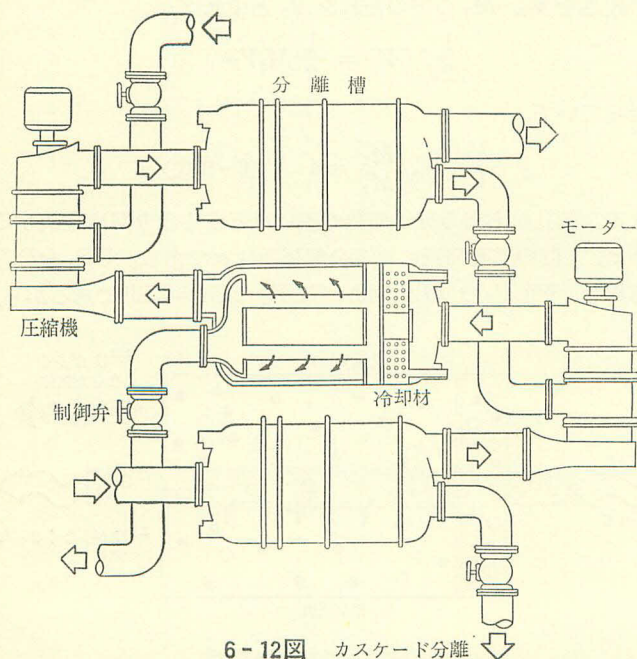
となっていて，

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \alpha \qquad \langle 6-3式\rangle$$

となる。細孔から出る分子の数は速いほど多くなり V に比例するために，1回の細孔通過による分離係数は α である。UF_6 を分離する場合，$^{235}UF_6$ は $M_1=349$，$^{238}UF_6$ は $M_2=352$ であるから，

6－11図　ガス拡散分離槽

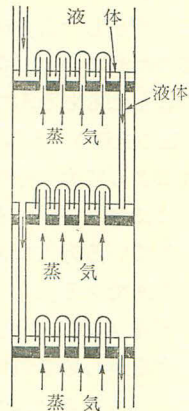
$\alpha=1.00429$ となり，1回で含有量に約0.4％の変化が起るだけである。すなわち，天然ウラニウムに ^{235}U がはじめ0.7％含まれているのが，1回の細孔通過によって $0.7\times1.00429\doteqdot0.703$％になるだけである。したがってこれを50％とか90％にするためには何回も細孔通過を繰りかえさねばならない。

〔6－11図〕は拡散分離槽である。左方から圧力の大きい気体が入り，隔壁を通過して圧力が下るが，^{235}U の含有量が多くなっている。隔壁を通らなかった残りの気体は ^{235}U が少なくなっている。

〔6－12図〕はカスケード分離といって，〔6－11図〕の分離槽を

6－12図 カスケード分離

何段もカスケードにつないだものである。隔壁を通って濃縮された気体は圧縮機で圧力を上げられて次の段に送られ，さらに濃縮されていく。ある分離槽で隔壁を通らなかったものは，一つ下の段に，これも圧縮機によって送りこまれる。こうして，上の方にだんだんと濃縮されたものが移動し，稀薄になったものはだんだんと下方に移動していく。かくして分離が行なわれる。

6－13図
カスケード分溜塔

ところでこのようなカスケード分離は，蒸気圧の違いを利用して石油の原油のような混合物の分溜に利用されている。〔6－13図〕はその原理である。熱によって蒸発した原油の蒸気は，図のような円筒の先端にカップをつけた装置を通じて上段の液の中に送られる。この中で液化したものは下段に下るし，液化しない蒸気は上の段に上っていく。こうして上の方の段には蒸気圧の高いものが，下の方の段には蒸気圧の低いものがあつまる。石油の原油をガソリン，燈油，重油などに分溜するのはこの方法によっている。

^{235}Uのガス拡散分離法では隔壁が大切である。六フッ化ウラニウムは物を腐蝕させる力が非常に強いので，これに耐えるものでなければならない。また，適当な大きさの細孔を持っていなければならない。その大きさがそろっていなければならない。現在のところ各国ともに隔壁の製法は極秘にしていて，まったくわからない。ガス拡散法を実施しようとすれば自ら開発するより仕方がない。また，この分離法を実施するには大がかりな工場が必要である。

秘密といえば〔6－12図〕の圧縮機の軸のパッキングの件も極秘である。また，このモーターを動かすための電力量も非常に大

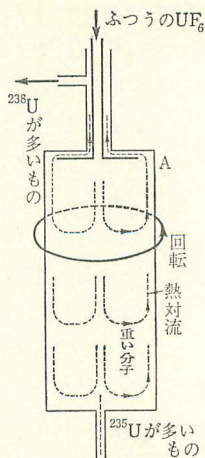
きい。といっても，分離した ^{235}U によって発電をしたときに得られる電力量は，分離のために消費した電力量よりずっと大きいことはもちろんである。

6-14図
遠心分離法の原理

遠心分離法　^{235}U の遠心分離法は未だこれによって大量分離を実施しているというものではないが，各国とも将来のために注目している方法である。〔6-14図〕はその原理図である。

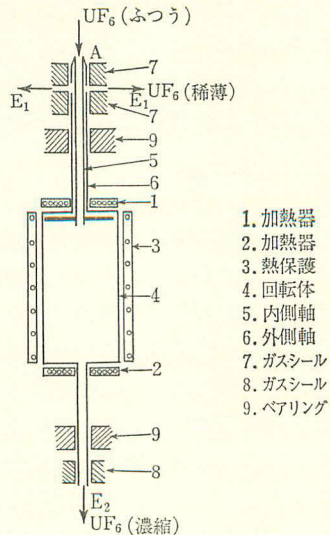
円筒Aは1分間に6万回転くらいで回転する遠心分離器である。この中に六フッ化ウラニウムを入れると，気体も円筒といっしょにまわり，このときに重い分子は外の方にいきやすい。外にきた気体は温度による対流作用で上方にいくようにすると，この外方の気体が上昇するにつれてその中の軽い分子は中央部にもどる機会があり，またさらに中央から重い分子を受け入れる機会もある。このようにして上方には重い分子が多くなり，下方には軽い分子が多くなる。結果として下方に ^{235}U の含有比が多くなった気体が出てくる。

〔6-15図〕は遠心分離の単位をやや具体的に説明したものである。遠心分離法では，円筒の回転数にもよるが，一つの単位による分離係数はガス拡散法より大きい。しかし，一つの単位で扱う気体量が少ないので，必要な単位の数はあまり少なくならないといわれる。そのために遠心分離法が将来ガス拡散法よりも有利になるかどうかは未だはっきりしていない。

科学技術の悩み　このようにして濃縮された核燃料は原子爆弾にも使われるし，原子力発電にも使われる。日本にこれから建設される原子力発電所はみな，濃縮されたウラニウムをアメリカか

ら輸入して使う。これによって日本の電力事情が好転することは喜ばしいことであるが，ウラニウムを濃縮する技術は，もともと軍事目的のために出発したものである。そのためには採算を度外視した研究も建設も行なわれたであろう。そのような技術によって作られたものを，ふつうの商業ベースにのせて考えることができるかどうか疑問である。

6－15図　ウラニウムの遠心分離

採算の点よりも重大なことは，はじめは軍事目的に開発された技術に依存して平和目的の発電を行なうことができる。また，もしもいずれかの国で平和目的のためにウラニウム濃縮の技術を開発したとしても，それは軍事目的にも使えるということである。ここに科学技術の根本的な悩みがある。仕方がないと割り切ってしまえばそれまでであるが，「人間的責任」を思うと悩みはつきないことになる。

これに似た話は発電機にもある。水力発電，火力発電，原子力発電といっているが，これに使う発電機の型式はみな同じである。イギリスのファラデーが1831年に発見した電磁誘導の現象を利用しているわけであって，現在の型式の発端は軍艦の探照燈のために大型直流発電機をある国の技術者が設計製作したのがはじまりであると聞いている。この探照燈をもつ軍艦は，夜戦で相手方をさんざんに悩ましたという。これが出発点になって，交流や直流の発電機が製作されるようになったのである。

これらは科学技術が平和目的にも軍事目的にも使える両刃の剣である例の一部にすぎない。この悩みは科学技術者だけが悩めばよいものだろうか。科学技術を生み出したものはわれわれ人類である。人類全体の悩みとすべきであろう。

§4　原子爆弾

原子爆弾の中には，核分裂だけを利用するもので核分裂爆弾ともよぶべきものと，主として核融合反応を利用するがその起爆剤として核分裂爆弾を利用するところの水素爆弾とよばれているものがある。水素爆弾については第7章で述べることとし，ここでは核分裂爆弾について述べよう。原子爆弾については，軍事機密に関係するのでくわしい技術報告は，まったくないといってよいくらいに少ない。たとえば核分裂爆弾の構造は〔1-7図〕のようであろうといわれ，また爆発の機構については第6章 §1で述べたようなものであろうとされている。しかし原子爆弾の構造については，これ以外の発表があってもくわしいことはわからない。それで一般的に理解できることを想像して説明する。

爆発力　爆弾の爆発力は，爆発のときに出てくるエネルギーの分量がまずさしあたりの目安になる。エネルギーの形式が，圧力か熱か放射線かという問題をあとまわしにして，エネルギーの総量について考えよう。

まず $^{235}_{92}U$ の分裂を考えて〈5-15式〉をもう一度書くと，L個の $^{235}_{92}U$ あたり，

$$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n=(\text{軽い分裂片})+(\text{重い分裂片})$$
$$+2.5n+1.87\times10^{13}\ \text{ジュール}$$

であり，L個の $^{235}_{92}U$ の質量は 235 g であるから 235 g から 1.87×10^{13} ジュールのエネルギーが出ることになる。

核分裂爆弾の爆発力を TNT 火薬のそれに比較してあらわすことが多い。TNT 火薬の爆発のときのエネルギーについて〈4-

6式〉をふたたび書くと，L個の分子について，

$$C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3\ (\text{TNT}) \longrightarrow \text{気体} + 6.0\times10^5\ \text{ジュール}$$

である。L個の分子の質量はTNTの分子量であり，227 gである。

これによると同じ質量から発生するエネルギーは，^{235}Uの方がTNTにくらべて，およそ3×10^7倍大きい。

$$\frac{\text{同じ質量の}\ ^{235}\text{U}\ \text{の爆発エネルギー}}{\text{同じ質量の TNT の爆発エネルギー}} = 3\times10^7 \qquad \langle 6-4\ \text{式}\rangle$$

TNT爆弾の大きさは使用しているTNTのトン数でいう。しかし原子爆弾のときには，使用している核燃料の質量に〈6－4式〉の因子をかけて示しているのではないと思う。その爆発力を推定して，それを目安にして決めていると考えられる。というのは核燃料のある部分は無駄になることもあり得るからである。たとえば昭和20年に広島に投下された原子爆弾は25キロトンといわれている。25キロトンのTNTが爆発したのと爆発力が等しいというのである。これをかりに〈6－4式〉で^{235}Uの質量に換算すると5 kgとなる。核分裂の能率ということがあるから，少なくとも5 kgの^{235}Uが使用されていると解すべきであろう。この計算によればTNT 1メガトン相当の原子爆弾では400 kg以上の^{235}Uが使用されているということになる。

原子爆弾の種類　核分裂爆弾には^{235}Uを使うか^{239}Puを使うかの区別がある。昭和20年に広島に投下されたのは，前にも述べたように，イオンを曲げる方法で分離した^{235}Uを用いたものであったということである。現在では^{235}Uの分離はガス拡散法によっている。一方，長崎に投下されたのは^{239}Puを用いたものという。^{239}Puは第5章§5で述べた方法によって原子炉の中で^{238}Uから転換して作ったものである。

このほかにあまりありがたくない変形が二つくらいある。その一つはウラニウム爆弾といわれるもので，ふつうの核分裂爆弾の

外側を多量の天然ウラニウムでかこんだものである。天然ウラニウムの中の ^{238}U は，〔5-1表〕でわかるように，^{235}U の$\frac{1}{4}$くらいの断面積で核分裂を起すから，連鎖反応に寄与することが大きくなくても，爆発エネルギーを大きくし，爆弾の威力が増す。一方，天然ウラニウムの中性子吸収断面積は〔6-2表〕でわかるように7バーンであって小さくない。このために，多量の放射性元素が作られる。核爆発のあとで周辺を放射能によって汚くすることがひどく大きいので「汚い原子爆弾」ともよばれている。

もう一つはコバルト爆弾である。爆弾の外側に金属コバルトを多量におく。これによると爆発力は大きくならないが，爆発のときに出てくる中性子が，第5章§5で述べた捕獲反応を起して多量の ^{60}Co ができて四散する。

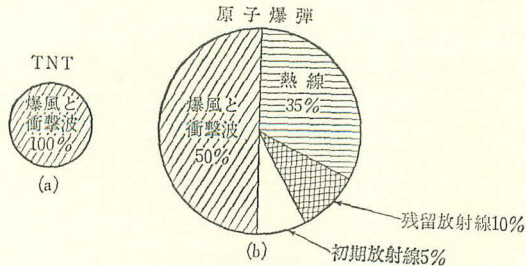
これによって爆発地の周辺に強い放射能が生まれて生物の生存を困難にする。^{60}Co の半減期は5年であるから，10年も20年にもわたって環境を悪くしてしまう。

爆発の威力　原子爆弾の爆発の威力の目安として，まず爆発の全エネルギーを TNT 火薬の爆発エネルギーと比較した。ここではさらにすすんでエネルギーの区分について考えよう。TNT 火薬では，高温による熱線を感ずるのは爆発のすぐ近くだけで，やや遠方では爆風または衝撃波だけを感ずる。しかし原子爆弾では，爆風だけでなく，熱線，放射線が加わる。といっても，爆風のエネルギーは非常に大きいので，これによる被害がもっとも大きい。建物が破壊され，倒されるわけである。

原子爆弾では核反応が起るのであるから放射線が出るのは当然であるが，熱線が強いのは次のことからうなずける。物体の温度が高いということは，その中の分子が振動しているエネルギーが大きいということである。爆発によって温度が上るのは，高いエネルギーを持った分子が物質の中の他の原子に衝突してその運動をはげしくするからである。TNT の場合には1個の分子が爆発

すると6.3eVのエネルギーが出る(〈4-6式〉)。これが仮りに6個の分裂分子に分けられたとすると1eVとなり，これを第3章§5で述べたと同じ方法で温度に換算すると，$273\times1/0.024\doteqdot11400°K$ で，約1万度となり，爆発物の温度はこれを越えることはなく，これよりずっと低いはずである。

これにくらべて，核分裂のときの分裂片のエネルギーは70MeVに達し，これを上と同じように温度に換算すると $8.0\times10^{11}°K$ という非常な高温になる。実際の爆発物の温度がこんなになることはなく，これよりずっと低いであろうが，それでもふつうの火薬のときにくらべて非常な高温になることはうなずける。この高温のために多量の熱線が出る。この熱線は爆発の瞬間に放出されてものを焦がし，発火させ，人などに危害を与える。爆心近くの木造家屋が発火し，人がひどい火傷をうけるのはこのためである。

爆発におけるエネルギーの区分を図に書くと，〔6-16図〕(a)(b)のようになる。TNTでは，(a)のように全部が爆風と衝撃波のエネルギーである。しかし原子爆弾の場合には(b)のように爆風と衝撃波のエネルギーは50％で，熱線のエネルギーが35％になっている。初期放射線は爆発のときに出るもので，β-線，α-線，γ-線，中性子が含まれているが，β-線やα-線は遠方にはとどかない。遠方にとどくのはγ-線と中性子である。この両方ともに人体に害を及ぼす。殊に爆心の近くにいた人は強い放射線障害を受けて，死または重症になる。中性子とγ-線の害をくら

TNT
爆風と衝撃波100％
(a)

6-16図　爆発エネルギーの区分

べると爆発の近くでは中性子の害の方が大きいが，遠方では γ-線の害の方が大きくなる。

熱線と初期放射線は強いものであっても，爆発のときに限られるが，エネルギーの 10 % をしめる残存放射能は長く持続するのでぐあいが悪い。残存放射能のうち代表的なものは〔5-3 表〕に示した ^{90}Sr，^{137}Cs などである。これらのものは地上に降下するものもあるが，一部は高空にとび上ったものが高層気流に運ばれて遠方に運ばれてから降下することがある。これらが，いろいろな筋道を通って人体に入ると害になるおそれがある。

ウラニウム爆弾やコバルト爆弾では，初期放射線も増すが，殊に残存放射能が著しく増大する。

§5　原子炉の動力利用

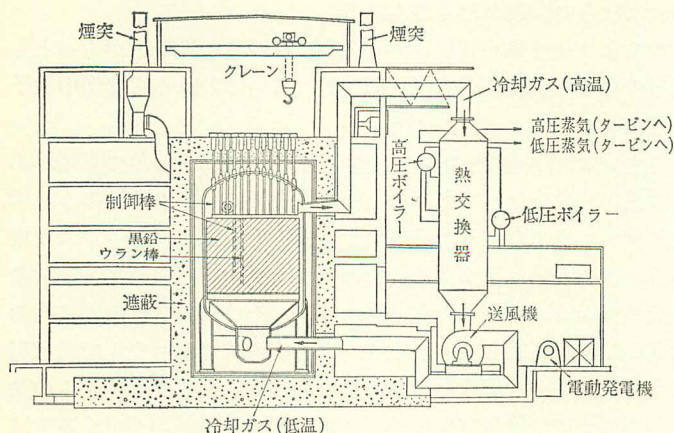
核分裂によって連鎖反応を起し，エネルギーをとり出す可能性が生まれたときに，だれもがまず考えるのは，発電とか，船などの交通機関にそのエネルギーを利用することであったろう。つまり動力に利用することである。しかし，原子爆弾としてその爆発のエネルギーを利用する方が技術的にはるかに容易であることにだれかが気がついて，まず爆弾が作られてしまった。

原子力の動力利用は原子爆弾よりはるかにむずかしい。爆弾ならば，反応はどんなに早く進行してもよい。早ければ早いほどよいわけである。その結果，連鎖反応を起している本体がどんなに高温になってもかまわない。高温になる方がよいわけである。動力利用ではそうはいかない。あまりに高温になると，炉を構成する部品が融けたり蒸発したりして，あとかたもなくなってしまう。急激に多量のエネルギーが出現しては困るので，きめられたエネルギーが連続的に出てこなければならない。つまり制御が行なわれなければならない。放射線については運転者その他の人に危害を及ぼさないように設計しなければならぬ。その他，技術的に解

かねばならぬ問題がたくさんある。

このような技術的問題を解くためには，熱中性子炉がもっとも容易であった。現在動力利用に使われているのはみんな熱中性子炉である。

天然ウラニウムを使う発電　熱中性子炉が制御その他の見地からとり扱いやすいわけであるが，〔6－3表〕に示した分類のうちで，天然ウラニウムを使うか濃縮ウラニウムまたはプルトニウムを用いるかという分れ道がある。濃縮ウラニウムを使えば，減速材の選択の幅が広がるなどの利点があるが，そのためには濃縮技術を開発しなければならない。とすればまず天然ウラニウムで動力利用を行なうことを試みるのは当然であろう。天然ウラニウムの動力利用原子炉の開発はまずイギリスで始まったが，イギリスではウラニウムの濃縮の技術が比較的におくれていたのもそのようになる原因の一つであったろう。

イギリスでまず作られたのは天然ウラニウムを使い，減速材としては黒鉛（炭素）を，冷却材には二酸化炭素ガスを使うものである。その構造の大要を〔6－17図〕に示す。炉心には天然ウラニウムの棒と黒鉛が積み重ねられ，燃料は合金で被覆され，冷却材との熱交換をよくするためにひだをつけてある。冷却材の二酸化炭素ガスは燃料棒の間を流れ，炉心を冷却すると同時に自分は高温になって炉心から出ていき，熱交換器で水から水蒸気を作る。この水蒸気がタービンで発電機をまわして発電するわけである。この型のものはコールダーホールにはじめて作られたので，コールダーホール型とよばれている。はじめて作られたものの電力の出力は 23 MW であった。運転を開始したのは 1956 年で，営業送電を行なったものとしては世界最初のものである。イギリスにはこれより大型のものを含めて約 20 基が建設されていて，フランスにも同型のものが 4 基ある。また日本でも東海村にある日本原子力発電株式会社の発電炉はこの型であって，すでに発電を行

6－17図 コールダーホール型発電炉の構造

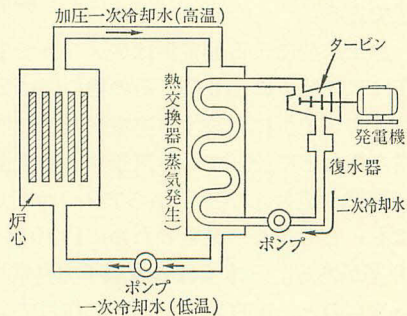
なっている。その出力は17MWである。この出力は東京電力の送電系統に組み込まれているから，一般工場や家庭に来ている電力の中にはこの発電炉による電力が含まれているわけである。

天然ウラニウムを燃料として使うと，核分裂を行なわない^{238}Uを多量に含んでいるために，〔6－1表〕のηが濃縮ウラニウムにくらべて小さく，前に述べたように減速材や冷却材として水を使うことができない。また，燃料を被覆するのに，中性子を吸収することの少ない合金を使う必要があり，このために温度が400度より上らないようにする必要がある。したがって，充分に高温の水蒸気を作ることができないので，発電の能率は比較的に低くなる。

濃縮ウラニウムを使う発電　核燃料に濃縮ウラニウムを使えば，増倍率の中のηが大きくなるので，減速材に水を使うことができる。水の中の陽子による熱中性子の捕獲のためにpが小さくなっても，全体として増倍率kを1より大きくすることができて，原子炉に連鎖反応を起すことができることを前にも述べた。減速材

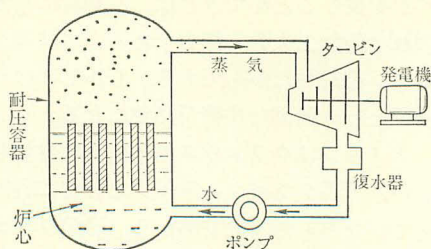
に水を使うことができれば，冷却材にも水を使うことができる。これは設計上大きい魅力である。水は簡単にとり扱うことができるよい冷却材だからである。しかしこのためには，ウラニウムの濃縮という面倒な技術が必要になる。

アメリカはウラニウム濃縮技術に自信を持っていたためであろうが，天然ウラニウム原子炉を動力に利用することはまったく考えていなかった。はじめから，濃縮ウラニウムによる原子炉を発電や原子力船に利用することを考えていた。

濃縮ウラニウムを使う原子炉には加圧水型と沸騰水型の２種類がある。〔6－18図〕は加圧水型発電炉の説明図である。炉心には濃縮ウラニウムの核燃料が板状に緻密にならべられ，その間を水が流れて冷却する。水は減速材を兼ねているわけである。水は１気圧では100℃で沸騰するので，高温にするために全体を圧力容器に入れて水の圧力をあげる。一例では140気圧にし，350℃でも沸騰しないようにする。水は循環ポンプでまわし，熱交換機で水蒸気を発生してタービンをまわす。熱交換器を通ったあとでは温度が下る。図では低温となっているが，実際の温度は200℃から300℃の間である。

6－18図　加圧水型発電炉

このように熱交換器でできた水蒸気がタービンをまわし，タービンが発電機をまわすことは，ふつうの火力発電と同じである。

一方，沸騰水型は，〔6－19図〕のように，もっと簡単にして，加圧容器の中にある炉心の中で水が沸騰するようにしたものである。この型では熱交換器が不要となって，設計はさらに簡単にな

る。そのかわりに炉心で水が沸騰するために，減速材の密度が不均一になり，連鎖反応が不安定になる心配がある。その心配があっても，設計の簡単さのために採用されることも多い型である。

6-19図　沸騰水型発電炉

加圧水型による発電炉はアメリカで1957年から運転され，現在はアメリカに約6基，その他の国に20基がある。日本では関西電力が美浜に建設する発電炉はこの型である。なおアメリカが潜水艦などに使っている原子炉は加圧水型であるとされている。

沸騰水型も，1959年からアメリカで運転されていて，アメリカにもっとも多く，発電のために約10基があり，その他の国に約10基がある。日本では日本原子力発電株式会社が敦賀に作っているものと，東京電力が福島に作っているものがこの型である。

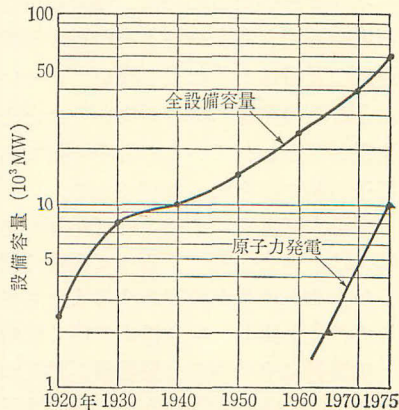
日本で将来建設される発電炉は濃縮ウラニウムを用いるものばかりである。そして，1975年までに13基の発電炉が運転される予定で，そのときの原子力発電の設備容量は約5000 MW になる。1 MW は 1000 kW のことであり，一つの発電機の容量をたとえば6万キロワットとすれば 60 MW 容量である。また設備容量というのは発電機の最大出力を合計したものであって，ふつうは最大出力の発電を行なわないから，実際の発電量はこれよりずっと低い。運転停止のことも考慮すると，実際に利用される電力は全設備容量の 10～20％になっている。

次に原子力発電が全電力に対してどのような割合になっているかを考えよう。〔6-20図〕は日本の発電計画を示している。これは過去の発電の実際から将来を推測したものである。これによる

と1975年には全設備容量 80×10^3 MW のうち原子力発電は 5×10^3 MW となり，1980年には全設備容量は 120×10^3 MW となり，そのうち原子力発電は 17×10^3 MW とされている。

〔6-21図〕は英国の発電計画である。日本の計画と同程度になっている。〔6-22図〕は米国のそれである。日本の発電計画の4倍に近いものになっている。これらの国では1980年には全発電設備容量のうち1/8から1/4のものが原子力発電になると予定している。

6-20図　日本の発電計画
科学技術庁原子力開発利用長期計画1967による

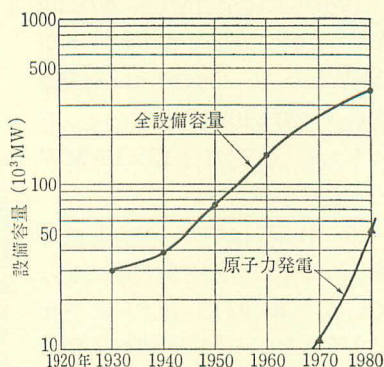
原子力発電の特質　原子力発電の大きな魅力は，人類に豊富なエネルギーを供給するということである。現在，電力の多くの部分は火力発電によっているが，このためには石油または石炭を使用している。経済的に採掘できるものはこれから50年ないし70年で使いつくしてしまうという予想がある。これに対して，原子核エネルギーの方は，石油などの約10倍のエネルギーを供給できる燃料があるとされている。

6-21図　英国の発電計画

ただし，このためには後に述べる増殖炉によるウラニウムの完全利用に成功する必要がある。これに成功すれば，人類のエネルギー需要の増大を見こんでも，さらに80年ないし120年の間エネルギーを供給できるとされている。一方，石油や石炭は燃料としてでなく，いろいろ化学製品の原料として大切で，その方にまわす必要があるから，原子核エネルギーによって発電することはますます大切になる。世界各国が原子力発電に熱心なのはこの理由による。

6-22図　米国の発電計画

原子力発電のもう一つの利点は，少しの燃料から非常に多くのエネルギーが出るために，燃料の重さが小さくてすむことである。石炭や石油を海上や地上を輸送する費用にくらべれば，核燃料の運搬の費用はとるに足らない。よくいわれているように交通不便なところの発電に都合がよい。たとえば南極探険の基地で原子力発電が行なわれているのもその例である。この事情は後に述べる原子力船の場合にも有利である。

原子力発電にはよいことばかりがあるわけではない。設計，運転には，火力発電にくらべて高度の技術が必要である。これをいいかえると技術を得意とする人たちまたは国家が，大いに努力をして特長を出し，生き抜いていく境地があるということになる。

核燃料はその中の分裂物質が燃えつきるまで使用することはできない。分裂生成物のうち，熱中性子を強く吸収する物質，たとえば ^{135}Xe が蓄積すると，増倍率の中の p が小さくなって連鎖反

応が起りにくくなる。このために適当な時期に核燃料をとり出して，化学処理によって有害なものをとり除く必要がある。この化学処理のときに，^{90}Sr，^{137}Cs の放射性同位元素や，^{238}U が変化してできている ^{239}Pu もとり出す。^{239}Pu は核燃料として利用するが，^{90}Sr などの放射性同位元素の大部分は不要である。不要なものの処理が問題である。処理の方法としては次のやり方が考えられている。

(1)　海底に棄てる

(2)　地下深く埋める

(3)　特定の地域に保管する

いずれにしても，50年から100年にわたって浮び上ったり，洩れたり，人の住んでいるところに運ばれたりすることがないようにする必要がある。このためには深い注意と努力が必要である。

ふつうの火力発電でも廃出ガスの公害問題はある。しかし原子力発電の公害は，核分裂生成物の放射線のために，火力発電よりも問題は大きい。関係者の関心と高度の技術が要求される。

原子力船　原子炉の動力利用として発電の次に注目すべきものは原子力船であろう。原子炉を船の動力に利用することの第一の特徴は，燃料がきわめて軽いので石油や石炭を燃料とする場合にくらべてきわめて大きい航続距離が可能なことである。第二の特徴は，燃焼のために酸素を必要としないのと，燃焼のあとの排気ガスもないので潜水艦に応用すると浮上しないで非常に長い間航行を続けることが可能なことである。

原子力船では加圧水型原子炉が使われることが多い。発電と違うのは，熱交換機で作られた水蒸気がタービンをまわし，タービンが直接に船の推進機をまわせばよいことである。原子炉を動力源としてはじめて運行したのは1954年に就航したアメリカの原子力潜水艦ノーチラス号である。その後，たくさんの原子力潜水艦，原子力航空母艦や軍用でない原子力船が作られている。

マッチ1本のエネルギーで汽船が太平洋を何往復もするという話を，1920年代には私を含む少年はSFのような気持で聞いたものである。それが30年あとには実現したわけである。自然科学の進歩に支えられた技術の発展の速さには驚くばかりである。

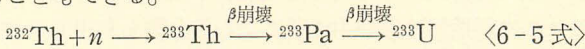
この驚きも喜びも，いまのところ，原子力船の利用は軍艦の場合が大部分であることによって減殺される。しかし次の話は平和利用の大きな夢である。大型潜水船を作って貨物や人の海中輸送を行なうと，動力が非常に経済である。船は海上を走るとき，造波抵抗といって，波を立てて走るために抵抗が大きい。潜水して海中を走ると，波を立てなくてすむので，必要な動力が少なくてすむ。このような運航方法に夢をかけている船舶技術者がいる。これが実現すると，大海を渡るのに，速くいくには高空をジェット機で，経済的に渡るには海底を大型原子力潜水船でいくのがよいという時代がくることになる。

§6　増殖炉——ウラニウムの完全利用

ウラニウムを使う原子炉には，天然のものを使う型，濃縮したものを使う型があるが，いずれの場合にも核分裂を起すのは天然のものの中に0.7％しか含まれていない^{235}Uである。しかし，連鎖反応の中で^{238}Uが中性子を捕獲することによって^{239}Puが生産され（〈5－19式〉参照），これは核分裂を起す性質があるから，エネルギー資源として利用できる。それで^{239}Puの生産をも計算に入れると，天然のウラニウムに対する割合として1％近いものが燃料として利用できる。この利用率は実際の炉では0.5～1.0％になっている。

天然にあるウラニウムやトリウムの資源のうちこのくらいの割合を利用していたのでは，資源埋蔵量の推定によると，原子力はこれから100年の世界のエネルギー問題に大きく寄与することはできないとされている。なんとかして100％に近い利用率を得ら

れないだろうかと考えるのは当然である。殊に原子炉の中では ^{238}U が ^{239}Pu に変換され，また次の反応によって ^{232}Th から ^{233}U を作ることもできる。

$$^{232}Th + n \longrightarrow {}^{233}Th \xrightarrow{\beta崩壊} {}^{233}Pa \xrightarrow{\beta崩壊} {}^{233}U \qquad \langle 6-5式\rangle$$

これらの反応を利用して，^{238}U や ^{232}Th を連鎖反応に利用できる核分裂物質に変換することができる。この可能性は，原子力開発のきわめて初期にアメリカのローレンスが指摘しているとのことであるが，このように核分裂物質の増殖をめざす原子炉が「増殖炉」である。

増殖炉の設計における問題　増殖炉の設計は，ふつうの原子炉にくらべて苦しいものになる。設計の容易さは原子爆弾，ふつうの原子炉，次が増殖炉の順であって，設計の苦しいものがあとになって作られる傾向はここにもみられる。さてふつうの原子炉では，1個の中性子が核分裂を起し，それによって中性子が $\bar{\nu}$ 個生まれて，そのうち1個が次の核分裂を起せば，連鎖反応は進んでいく。増殖炉ではこのほかに，新しい核分裂原子核を作るために中性子が必要である。仮りに1個の中性子が核分裂を起したとき，1個の新しい核分裂原子核が作られるとすれば，このために1個の中性子が必要である。つまり，連鎖反応をすすめるために必要な分を加えると，一つの核分裂あたり2個の中性子が必要になる。一方，核分裂原子核の増減の立場からみると，1個の核分裂が起ったときには1個の核分裂原子核が失われるから，このときに新しく1個以上の核分裂原子核が生まれれば，分裂核は減らないですむことになるわけである。

^{235}U が熱中性子で核分裂を起すときに出てくる中性子の数の平均は〔6-1表〕でわかるように，$\bar{\nu}$ は2.43であり，1個の中性子が吸収されたときに出てくる中性子の数 η は2.07である。これでは前に述べたように2個以上の中性子を連鎖反応と増殖に使える設計をすることはむずかしい。$\eta=2.07$ は2より大きいが

余裕が少なすぎるのである。

速い中性子による ^{239}Pu の分裂では $\bar{\nu}$ が 2.88 とか 3.09 であり，η は 2.45 または 2.95 となって増殖炉の設計にはぐあいがよい。このために増殖炉は速い中性子による核分裂を利用し，核燃料はほとんどの場合に ^{239}Pu を使っている。

中性子の数の問題をもう少し数量的に考えてみよう。〔6-2図〕の，速い中性子による連鎖反応で，中性子1個による核分裂によって $P\eta$ 個の中性子ができ，それが核燃料の中で核分裂を起して ε 倍になり，ふたたび核分裂を起す姿勢を持つものは $P\eta\varepsilon$ 個である。このうち1個は次の核分裂を起して連鎖反応を続行し，L 個は失われたとしよう。この L の中には，核燃料の外に逃げるもの，核燃料の中で失われても核分裂を起さないもの，あるいは ^{238}U に捕獲されても，新しい核分裂原子核を作ることのないものを含んでいる。そうすると残りの中性子は次のようになる。

$$(CR) = P\eta\varepsilon - 1 - L \qquad \langle 6\text{-}6\text{式}\rangle$$

この (CR) は中性子の数であり，1回の核分裂あたりこれだけの新しい核分裂原子核が生まれることになる。この (CR) を「転換比」(conversion ratio) とよんでいる。(CR) が1より大きいと次々と核分裂原子核は増大していくので，連鎖反応も激しくなるし，分裂物質の増殖は加速度的に大きくなる。このような状態になることが望ましい。連鎖反応を制御によって抑えて望ましい速さにすればよいからである。計画されている増殖炉では，多くの場合に $(CR)=1.2\sim1.4$ となっている。$(CR)=1.4$ とするためには $P\eta\varepsilon-L=(CR)+1=2.4$ となる。このためには速い中性子による ^{239}Pu の核分裂を使い，$\eta=2.45$ または $\eta=2.95$ というような大きい η の値を利用する以外に方法がないことがわかる。それでも ε は1に近い数であるから P を大きく L を小さくしなければならない。設計は容易ではない。

もし (CR) が1より小さいときにはどうであろうか。核燃料

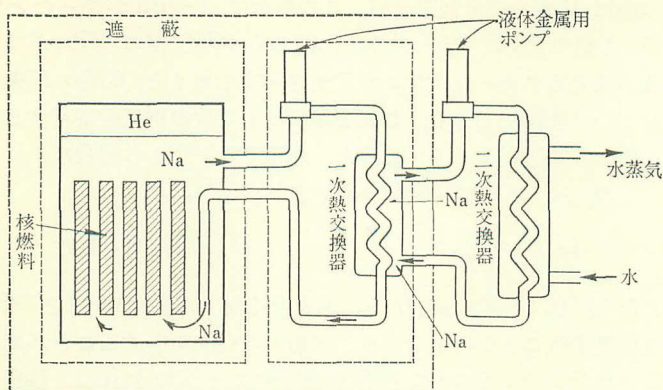
の中に N 個の核分裂原子核，この場合には ^{239}Pu があったとする。1個の ^{239}Pu が失われると，新しく (CR) 個の ^{239}Pu ができる。はじめにあった ^{239}Pu が燃えきってしまうと $(CR)\times N$ 個の新しい ^{239}Pu ができる。これを燃料にして次の増殖を実行する。このような過程をくりかえすと，利用する ^{239}Pu の総数は，

$$N_\infty = N((CR)+(CR)^2+(CR)^3+\cdots\cdots\cdots\cdots)$$

$$= \frac{N}{1-(CR)} \qquad \langle 6\text{-}7\text{式}\rangle$$

となる。$(CR)\fallingdotseq 1$ ならば N_∞ が大きくなり ^{238}U の全部を ^{239}Pu は転換することが可能であり，増殖炉の目的を達することができる。またこのようにして ^{238}U を燃やすことができれば，核燃料のとり換えの手間もはぶけ，さらに大きいことはウラニウムの分離，濃縮という面倒なこともやらなくてすむことになる。

増殖炉の構造　増殖炉の構造で特徴的なのは，冷却材にナトリウムまたはカリウムの液体金属を使うことである。もちろん熔けて液体の状態で使う。水が使えないのは，速い中性子のままで連鎖反応を行なわせるために水の中の陽子による減速を避けるためである。また，濃縮ウラニウムまたはプルトニウムを核燃料に使うので，狭いところから多量の熱が出るから，コールダーホール型のように気体冷却では熱の運搬が追いつかないからである。〔6-23図〕は増殖炉の概念図である。ナトリウムは炉心の中性子によって放射能を持つので，熱交換機で水に直接に触れて水蒸気を作ることを避け，炉心から出たナトリウムが一次熱交換機で二次冷却ナトリウムを加熱し，二次冷却ナトリウムが二次熱交換機で水蒸気を発生するようになっている。

核燃料としては，^{239}Pu またはこれと ^{235}U の混合物が用いられるが，高温における安定のために酸化物にして使用されることが多い。炉心に転換されるための天然ウラニウムを置くことはもちろんである。

6-23図　増殖炉の一例

増殖炉では炉心の中性子密度も温度も高い。そのために高い密度の中性子の照射に耐える物質の研究，または高温に耐える物質や燃料の研究が必要である。さらに金属ナトリウムやカリウムを冷却に使うので，炉の容器，冷却管，循環ポンプ等が腐触されないようにする対策も考えねばならない。

もともとふつうの原子炉でも，火力発電にくらべては技術の水準が高いので，研究すべきことが多い。増殖炉にいたっては，研究すべき技術の内容はきわめて高度でその量も多い。増殖炉の安定な運転に成功すれば，世界のエネルギー問題は非常に明るくなる。それは手をこまねいていてできることではない。解くべき技術的問題が山積している。この問題を解いていくためには，いわゆる工学者，物理学者，化学者が緊密に協力する，計画化された研究が必要であろう。このためには科学者としての能力のほかに人間的な協力の精神が大切であると思う。

増殖炉への関心は，核分裂の発見の直後からあり，増殖炉をめざす試験炉ともいうべきものは1950年頃から米(4基)，英(1基)，ソ連（2基）の三国でスタートしている。その後も各国で，これ

らを改良するか，または新しく建設することによって研究をすすめている。

日本でもこの研究の必要がさけばれ，数年前から，国家的な計画になりつつある。「新型転換炉」または「増殖炉」の研究として，多額の予算を出し，各研究機関，会社が協力して研究をすすめることになり，そのために動力炉核燃料開発事業団が作られたことはよく知られている。増殖炉の技術的問題は，世界各国もこれからの問題としているところであり，日本が今からこの研究の戦列に参加することは大きい意味があろう。われわれ日本人の科学的能力や協力性がためされることになる。

§7　動力以外の利用

核分裂の連鎖反応を動力以外に利用するといえば，原子爆弾も動力とはいえないのでこれもその一つである。しかしこれについてはいままでに述べたこと以上にはふれない。ただ原子爆弾は地下爆発によって採鉱や土木工事の助けをする可能性もあることをつけ加えておこう。

1942年にフェルミがはじめて連鎖反応に成功したシカゴ大学の原子炉も動力を出すのが目的ではない。いわば「勉強」のためというか「研究」のためである。この原子炉は^{238}Uを転換して^{239}Puを作る目的もあったとのことである。

原子炉自身の動作をくらべるためとか，炉が発生する中性子を何かの目的に利用するための原子炉を「研究用原子炉」とよんでいる。〔6-7図〕に示したアメリカのアーゴンヌ研究所のCP-5は研究用原子炉の代表的なものである。このような研究用原子炉は，のちに述べる放射性同位元素の生産や物理学への応用ばかりでなく，材料試験という仕事もする。これは炉の中の支持材料として予定されるものを原子炉の中の強い中性子にあてて，損傷の程度を研究することである。これは原子炉の設計には大切な仕事

で，この目的を主とする原子炉を材料試験炉とよんでいる。

〔6-3図〕(b) に示した原子炉の構造は，核燃料に天然ウラニウムを，減速材に重水または炭素を使うことを考えて書いたものである。しかし濃縮ウラニウムを用いるときには，減速材に水を使うことができるので，動力を利用しないならばもっと簡単な構造でも連鎖反応を起すことができる。たとえば，濃縮ウラニウム約1kgを硫酸塩または硝酸塩として飽和水溶液を作れば，それで連鎖反応が起る。この型を「湯わかし型」とよんでいる。

また，濃縮ウラニウムまたはその合金を薄板にして組み合わせ，水の中に入れると，連鎖反応が起る。この型を「水泳プール型」とよんでいる。湯わかし型では小さすぎて研究用としては使途が限られるが，水泳プール型では強い中性子束が得られて，放射性同位元素の製造その他の目的に使用されている。

新しい原子核を作る　原子炉の中性子を使う例でもっとも注目すべきものは，放射性同位元素を作ることであろう。これは，一般的に表現して，新しい原子核を作ることである。

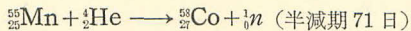
中性子を使って ^{238}U を ^{239}Pu に変換することについてはたびたび述べてきた。^{239}Pu は原子爆弾にも使えるもので，1945年に長崎におとされたものはこれを使ったということは前にも述べた。また ^{239}Pu は熱中性子原子炉の動力源となる以外に増殖炉の起動時の燃料として大切になるであろう。このほか，熱中性子の捕獲反応によって作り出す放射性同位元素の例は非常に多い。第5章§5の〈5-17式〉や〈5-18式〉で作られる ^{60}Co や ^{32}P がその代表的なものである。

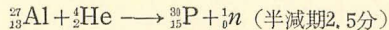
^{60}Co が出す γ-線は厚鉄板の透視，がんの治療などに使われている。いまでは電子を加速して作る γ-線に強いものがあり，これが利用されることもあるが，加速器は大型であり，持ち運びがむずかしく運転技術が必要であるから，^{60}Co のように簡便なものも多く利用されている。原子炉がない時代にはがんなどの治療に

はもっぱらラジウムの γ-線が用いられたが，ラジウムは高価で，昭和の初期に 1g のラジウムが当時の金で何万円もしたものである。いまならば何千万円である。それにくらべれば同じ分量の γ-線を使うのに ^{60}Co ならば10分の1あるいは100分の1の値段ですむ。原子炉の効用の一つである。

〈5-18式〉で作られる ^{32}P は，第8章で述べるように，トレーサーとして人体や植物の新陳代謝の研究などにとって大切な放射性同位元素である。

原子炉で作る放射性同位元素は，安定な同位元素に中性子を加えたものであり，中性子が多いために不安定になった原子核である。中性子が安定なものより少なくて，そのために不安定になった放射性同位元素は原子炉で作ることはできない。原子炉は原子核に中性子を加えることはできても，中性子を取り去ることはできないからである。このときにはサイクロトロンなどで加速した陽子，重陽子，α-粒子を用いて作る。たとえば安定な ^{59}Co より中性子の1個少ない ^{58}Co は次の反応によって作る。

$$^{55}_{25}Mn + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{58}_{27}Co + ^{1}_{0}n$$（半減期71日）

また，安定な ^{31}P より1個だけ中性子の少ない ^{30}P は次の反応で作る。

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$（半減期2.5分）

原子炉では比較的容易に放射性同位元素が作れるので，これが物理学，化学，生物学，地質学などの自然科学の進歩に寄与したことは測り知れないものがある。このように一般には知られないところで人類の福祉に貢献していることは，動力としての原子力の貢献にくらべて勝るとも劣らないとされている。

物理学への応用　原子炉は物理学への大きな応用範囲を持っている。それは熱中性子を物質にあて，中性子の波動としての性質を利用して，散乱のようすが変ることをしらべて，結晶構造やその中の原子の配列または原子の性質をしらべることができるので

ある。

物理学では，電磁波は波としての性質と粒子としての性質を持っている。「物理学では」とひらき直らなくても，現実に，電磁波はこの両方の性質を持っている。現実を認めるならば，電磁波の二面性を認めざるを得ない。一方，電子，陽子，中性子などの粒子も，粒子としての性質と波としての性質を兼ねそなえている。これも現実である。

粒子が波としての性質をあらわすときの波長λをドブロイー波長といい，

$$\lambda=\frac{h}{p} \qquad \langle 6-8\text{式}\rangle$$

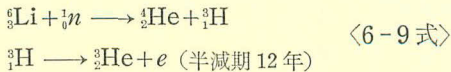
であらわすことができる。ここにpは第3章§6で述べた粒子の運動量であり，hはプランクの常数である。運動量pは粒子のエネルギーとその質量できまるが，電子，陽子，中性子について，波長が約3オングストローム（3×10^{-10}m）になるエネルギーを〔6-4表〕に示した。3オングストロームは，結晶の中の分子の配列間の距離であって，これと同じくらいの波長になると，波が結晶の分子に散乱されて回折や干渉を起しやすい。表によると電子ならば 15 eV で波長が約3×10^{-10}mになり，陽子と中性子では 0.009 eV でそうなる。つまり電子ならば，15 eV で起る結晶による回折現象が，中性子ならば 0.009 eV で起る。熱中性子の平均のエネルギーが 0.025 eV であるが，このエネルギーは幅の広い分布を持っているので，その中の中性子を使って結晶についての物理学的研究ができるわけである。このためには，中性子のエネルギーをえらぶ装置が必要である。一方，中性子は電荷を持っていないので，電

	波　　長	エネルギー
電　　子	3×10^{-10}m	~15 eV
陽　　子	3×10^{-10}m	0.009 eV
中 性 子	3×10^{-10}m	0.009 eV

6-4表　粒子の波長とエネルギー

子とは違う面をしらべることができる。たとえば，原子の磁気的性質をしらべる研究に，熱中性子線の回折による論文をよくみかける。熱中性子を使うこのような論文は，よい原子炉をたくさん持っているアメリカなどに多く見られるが，日本ではこのような実験はまだゆっくりとはできない。このために使える原子炉が少ないからである。この方面の研究者は，このための原子炉の数をふやすことを強く希望している状態である。

原子炉が物理学の研究のためになくてはならないものになっているもう一つの例は，He の生産である。^{3}He は安定であって，地下から出てくるヘリウムの中には約 10 万分の 1 含まれている。しかしこれはあまりに微量であって，あつめて利用するわけにはいかない。しかし最近は次のようにして原子炉の中性子を使って作られるようになった。

$$
\left.\begin{array}{l} {}^{6}_{3}\mathrm{Li}+{}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{3}_{1}\mathrm{H} \\ {}^{3}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}+e \text{（半減期 12 年）} \end{array}\right. \quad \langle 6\text{-}9 \text{式} \rangle
$$

つまり，リシウムを原子炉の中におくと，中性子によってヘリウムと三重水素ができる。この三重水素は 12 年の半減期で $^{3}_{2}$He になる。

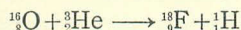
この ^{3}He は物理学者にとって今までできなかったことを可能にしている。その一つは極低温物理学への貢献である。ヘリウムを液化することによって，極低温といって絶対 0 度に近い温度を作り，物質の結晶の中の分子の運動が極端に少なくなった状態の研究が行なわれている。結晶を作る分子の運動が静止に近づいてくると，温度が高いところでは見ることのできなかった基本的な物質の性質があらわれるので，物理学の分野の中で極低温の分野はもっとも大切な分野の一つとされている。

ふつうのヘリウムを液化すると 1 気圧では絶対温度で約 4 度になる。これを真空ポンプで減圧してやると 1 度に近づいていく。これから温度を下げて 0.1 度，0.01 度またはそれ以下にすること

に物理学者はいつも努力している。このためには，磁石とか，磁気に関係のある結晶とか，ちょっと考えると低温とは関係のなさそうなものも使う。

このような低温を作るのに，^{3}He は一つの方法を提供し，世界の極低温物理学者はこぞってこの研究に従事している。^{3}He は ^{4}He と原子の質量が違うために液化の温度や液化の潜熱が違うので，^{4}He ではできなかったことを可能にするわけである。ここでくわしい話ができないのは残念であるが，とにかく今までになかったもので，これを使うと従来不可能であったことが可能になる。原子炉でないと作れない ^{3}He が物理学の基本問題を研究するために大切な役目を果している。

^{3}He はもう一つ大切な役目を果している。^{3}He のイオンをサイクロトロンなどで加速して原子核をたたくと，今まではなかった珍しい原子核反応を起したり，まったく新しい放射性同位元素を作ることができる。その例は，

$$^{16}_{8}O + ^{3}_{2}He \longrightarrow ^{18}_{9}F + ^{1}_{1}H$$

のようにして作られる $^{18}_{9}$F である。これは半減期 110 分の放射性同位元素で，医学研究のトレーサーに利用される。

このような ^{3}He の利用による新しい学問分野はこれからどんどん拡がるであろう。

さてこの ^{3}He は日本ではアメリカから輸入している。日本の原子炉ではこれを生産するところまでいっていないからである。しかも，アメリカの原子炉が〈6－9式〉の反応で $^{3}_{1}$H を作るのは，おそらく水素爆弾の爆薬とするためであろう。それは 12 年の半減期で $^{3}_{2}$He になってしまう。このようにしてできた ^{3}He を利用させていただいているというわけである。輸入するときに相当に高い値段を払っているとしても，水素爆弾のために生産されたものを利用するのは気にかかることである。しかし，自然の秘密にいどんでいる人に，そのような ^{3}He は戦争に関係のあるもので

あるから使うのはやめなさいとはとても言えない。

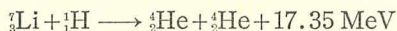
原子炉が物理学のために新しい物質を作り出している例がもう一つある。それは原子番号43のテクネチウムである。この元素には安定な同位元素はなく，みんな放射性同位元素である。中には半減期10万年というものがあるから，いったん作ると長い間そのままでいる。ただし作るには原子炉のやっかいにならなければならない。原子炉によれば容易に作れるとされている。このテクネチウムが，超電導の材料として特別によい性質を示すらしいのである。超電導というのは，極低温で特別な金属は電気抵抗が0になる現象である。原子炉の生産物がこのような研究の必需品になる日がくるかもしれない。

核分裂の発見は，人類に原子爆弾と放射能のおそれという禍いをもたらしている。しかし一方ここで述べたような利益もたくさんもたらしている。ものごとは簡単な考えによって結末をつけることはできない。

第7章　核融合反応

§1　核融合反応とは

1932年に英国のコッククロフトらによってリシウムと陽子による原子核反応（〈5-7式〉）

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}+^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He}+^{4}_{2}\mathrm{He}+17.35\,\mathrm{MeV}$$

が発見されてから，このような反応は非常に多く見出されている。これらの反応を利用してエネルギーをとり出し，動力として利用できないかと，多くの人が考えたことについてはすでに述べた。このような原子核反応はサイクロトロンなどの加速器を使って起すのであるが，加速器を使ったのでは反応のエネルギーを動力に使うことはとても不可能であることもすでに述べた。ラザフォードが原子核エネルギーを動力に使うことは不可能であろうと言ったことがあるのはこのような事情によるのである。

しかし1939年に核分裂反応が発見されると，これまでに述べてきたように，原子核反応を動力に利用することが急速に実現した。リシウムと陽子の反応ではむずかしくて，核分裂反応によると核エネルギーの動力利用がなんとか可能になったのは核分裂反応による方が技術的に容易な面を持っているためである。

しかし，たとえ困難でも，リシウムと陽子の反応のような原子核反応を使って原子核エネルギーを人類の生活のために利用する方法はないだろうかと，物理学者も技術者もくふうと努力を続けている。これが核融合反応の研究である。

核融合反応のいろいろ　核融合反応といわれるものは何も〈5-7式〉の陽子とリシウムの反応だけを用いるのではない。第3章

§9で，原子核の結合エネルギーについて〔3-41図〕で説明したように，核分裂反応ではウラニウムのような重い原子核が図の矢印Bのように二つに分裂すると，エネルギーが出てくる。これと反対に水素とかリシウムというような軽い原子核が図の矢印Aのように結合して重い原子核になると，これも結合エネルギーが大きい方に移るから，エネルギーが出てくる。

このときのエネルギーを利用しようというのが「核融合反応」である。軽い原子核が融合して重い原子核に変っていくときにあらわれるエネルギーを利用するので「融合」という言葉を使うのである。

核融合に利用される核反応にはいろいろのものがある。利用されるための条件としてはまず反応のエネルギー Q が大きいほどよい。しかし Q ばかり大きくても，起りにくい反応は困る。核融合に利用される反応では，衝突する二つの原子核が両方とも電荷を持っている点が，核分裂が電荷を持たない中性子によって起るのと違う。そのために核融合では第5章§1で述べたクーロン障壁が二つの原子核が近づくのをさまたげる。このことが，核エネルギーの動力利用において核融合を技術的にむずかしくしているのである。とにかく核融合反応ではクーロン障壁が低ければ低いほどよい。このためには Z（原子番号）の小さい原子核ほど都合がよいことになる。

Z の小さい原子核の反応としては太陽の中心で起っているとされている次のようなものがまず考えられる。${}^{1}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{2}_{1}\mathrm{H}+e$, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{3}_{2}\mathrm{He}+h\nu$, ${}^{3}_{2}\mathrm{He}+{}^{3}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$。しかしこれらの反応を地上で起す可能性，つまり断面積がひどく小さいので問題にならない。

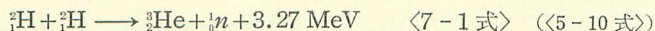
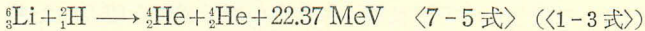
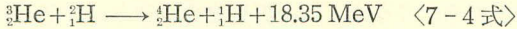
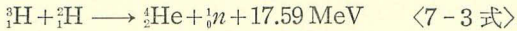
そこで核融合反応の利用の候補に上る原子核反応は次のようなものである。

$${}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{3}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}n+3.27\ \mathrm{MeV}$$ 〈7-1式〉（〈5-10式〉）

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 4.03\,\mathrm{MeV}$　〈7－2式〉(〈5－11式〉)

${}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}n + 17.59\,\mathrm{MeV}$　〈7－3式〉

${}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 18.35\,\mathrm{MeV}$　〈7－4式〉

${}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 22.37\,\mathrm{MeV}$　〈7－5式〉(〈1－3式〉)

これらの反応をサイクロトロンなどの加速器を使って実現することは容易である。しかしそれでは核エネルギーを利用することはできない。ではどうするのか，つまり核融合に成功するにはどうすればよいか。あとで述べるように，実ははっきりとしためどは立っていないのである。地球上で，われわれが生活しているところで核融合反応を実現するのはいまのところむずかしい。しかし，太陽のような大きい天体の中心では，中心での重力による圧力が大きいことのために，核融合反応が起っている。太陽の熱の源は実は核融合反応なのである。

水素爆弾　核融合反応を地球上で実現することはいまのところむずかしいといったが，一つの例外がある。むずかしいというのはエネルギーを少しずつ制御された形でとり出すのがむずかしいというのであって，原子爆弾のように制御の必要なく，あとは野となれ山となれのやり方ならば，核融合反応は実現しているのである。それは水素爆弾である。

水素爆弾は，重水素，3重水素 (${}^{3}_{1}\mathrm{H}$) やリシウム6 (${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$) を混合させたものに核融合反応を起させるといわれている。このときには〈7－3式〉〈7－5式〉の反応を利用することになる。また，重水素核と重水素核の間の反応〈7－1式〉〈7－2式〉も起る可能性もある。このときに生まれる ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ はさらに重水素核と反応して〈7－3式〉〈7－4式〉のものが起ることになる。

核融合反応を起させるためには，あとで述べるように，物質全体の分子の運動を非常にはげしくしてやる必要がある。このときの平均の運動のエネルギーを温度に換算すれば1億度以上になるものである。このような温度にすれば〈7－3式〉〈7－4式〉の反

応が次々と起り，自らの温度を維持しながら反応が進み，エネルギーを外に吐き出す。

重水素，3重水素，リシウム6の混合物の温度を，はじめにこのような高温にするのには，ふつうの原子爆弾を使う。たとえてみれば，ガソリンと空気の混合物が多量にあり，それにマッチで火をつけるようなものである。マッチ1本がふつうの原子爆弾であり，ガソリンの方はいくらでも多量に用意できる。水素爆弾の破壊力の大きさがうなずけるというものである。

核融合反応の有利さ　実現できるといっても水素爆弾のようにはなはだ物騒なものはありがたくない。核融合反応が制御でき，少しずつ，われわれが利用できる形でエネルギーを供給できるようになれば，それこそ「ありがたい」ことになる。さてそれができるようになったとして，そのありがたさを考えてみよう。

核融合反応の主な燃料は重水素である。重水素は重水の形で水の中にある。重水を水から分離することは少し面倒なことであるとしても，とにかく水は0.015％の重水を含んでいる。原子炉の減速材のところで，重水は値段が高いといったが，核融合反応が成功してこれを燃料とすることを考えれば，安いものである。水の中に0.015％だけ含まれるといっても，海水の莫大な量を思えば，石油，石炭，核分裂燃料にくらべて，文字通り無尽蔵といえる。一つの推定によれば，人類にとって必要なエネルギーを実に10万年支えるということである。核融合反応が実現すれば，それこそエネルギーについては人類は「左うちわ」ということになる。ただ，重水を水から分離し，それによって核融合を起すために働く技術者の数とその仕事は，増していく一方であろう。

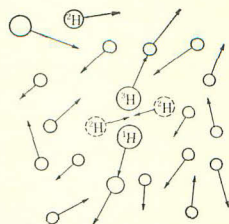
核融合反応が核分裂反応にくらべてたいへんにぐあいのよいことがもう一つある。それは核融合に利用される核反応のどれをとってみても，反応のあとに残る原子核が放射性同位元素でないことである。この点が核分裂反応とたいへん違う。無尽蔵の燃料で

無尽蔵のエネルギーを利用しても，公害を心配しなくてよいのである。

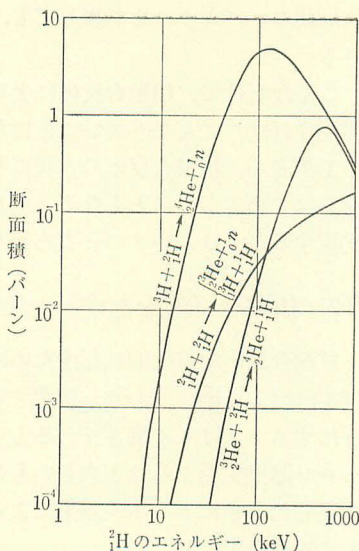
こんなわけで，核融合反応によるエネルギー利用がほんとうに実現すれば，こんなうまいことはないといえる。世界の物理学者や工学者が，核融合反応の実現に非常な熱意を示し，大規模な研究をはじめてももっともなことである。しかし，これを地球上で実現することは，いまのところ容易ではないのである。

§2　核融合反応を起す——その原理

核融合反応を持続的に起すためには，〔7-1図〕のように原子核がはげしく動きまわり，衝突するときに核反応を起しやすいようにする。はげしく動きまわるといっても，このエネルギーをクーロン障壁を越えるほど大きいものにすることはむずかしいが，衝突したときにトンネル効果によってある確率で反応が起るようにするわけである。

核反応によってあらわれるエネルギーは反応粒子の運動のエネルギーになる。この反応粒子が，反応前の原子核に衝突して，この運動のエネルギーを大きくする。つまりその温度を上げる。反応が出発するときの粒子のエネルギーがあまりに小さいと，反応の起る確率はあまりにも小さい。エネルギーがある値になると，反応もひんぴんと起るようになり，発熱が大きくなるから，未だ反応しない粒子のエネルギーも大きくなり，さらに反応が起りやすくなる。このようなわけで，核融合反応を持続させるためには，反応前の粒子のエネルギーをある値以上にする必要がある。つまり温度を上げる必要がある。そして問題は，どのようにしてこのような高温を作り出すかということにな

7-1図　$^2_1$Hがはげしく動きまわる

る。

発生するエネルギー　核融合反応を起すときにまず出発点となるのは，〈7-1式〉〈7-2式〉〈7-3式〉などの反応が起る断面積の大きさである。これらはクーロン障壁をトンネル効果で通過する反応で，その断面積は量子力学によって計算できる。この計算の結果と実験結果を組み合わせた結果を〔7-2図〕に示す。図の ${}^2_1H + {}^2_1H$ 反応は〈7-1式〉と〈7-2式〉の反応を加えたもので ${}^2_1H$ のエネルギーが 15 keV で断面積が 10^{-4} バーンであったものが，100 keV では 3×10^{-2} バーンになっている。${}^3_1H + {}^2_1H$ の反応では，7 keV ですでに 10^{-4} バーンとなり，あとは急激に増大して，100 keV では 5 バーンになっている。${}^3_2He + {}^2_1H$ の反応ではエネルギーがやや大きくなってから断面積が大きくなるが，その増大のようすは ${}^3_1H + {}^2_1H$ 反応に似ている。

7-2図　断面積の大きさ

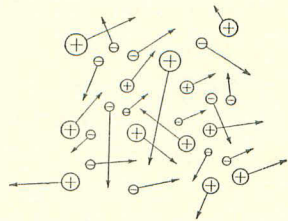
この断面積を使って反応が起る数を求め，発生するエネルギーを求めることができる。走りまわる ${}^2_1H$ の平均の速さを v cm/sec としよう。また相手方の原子核が 1 cm³ の中に n_2 個あるとする。そうすると ${}^2_1H$ は 1 秒間に n_2v 個の原子核の中を通りぬけるので，核反応を起す断面積が σ cm² ならば，一つの ${}^2_1H$ は 1 秒間 $n_2v\sigma$ 個の反応を起すことになる。1 cm³ の中にある ${}^2_1H$ の数が n_1 ならば，1 cm³ の中で 1 秒間に起る核反応の数は $n_1n_2v\sigma$ 個となる。一つの核反応で出てくるエネルギーを Q ジュールとすれば，

$1\,\mathrm{cm}^3$ の中から1秒間に出てくるエネルギーは，

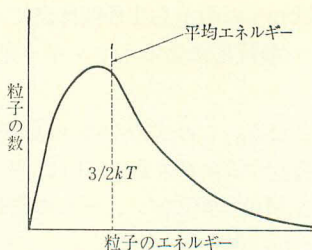
$$\text{核反応によるエネルギー発生} = n_1 n_2 v\sigma Q/\mathrm{cm^3.sec.}\ \text{ジュール}$$
〈7-6式〉

となる。この式の中の σ は〔7-2図〕で求められ，一つの反応で発生するエネルギー Q は〈7-1式〉……〈7-5式〉に示されている MeV 単位をジュールに直せばよい。しかし v はどうなるだろうか。

核反応が起るためには，〔7-1図〕でもわかるように，$^{2}_{1}\mathrm{H}$ などの粒子は 10 keV 以上になる必要がある。それより小さいエネルギーでは反応が起る確率はあまりに小さい。$^{2}_{1}\mathrm{H}$ などの粒子がこんなエネルギーになると，原子核と電子の間の原子としての結合は破れてしまう。水素では 50 eV でも原子核と電子はバラバラになる。まして 10 keV では原子核と電子はもうつながっていない。このようなありさまはもう気体とはいえない。正の電荷を持つ粒子と，負の電荷を持つ粒子が，同じ割合で混合している状態になる。このような状態を「プラズマ」とよんでいる。

このように核融合反応は物質のプラズマ状態でないと行なわれないわけで，いまプラズマの研究について科学者が大きい努力をはらっているのはこのためである。といっても，研究の意欲は，核融合利用のためばかりでなく，自然現象に対する基礎的な関心によってかきたてられている面も多い。というのは，ふつうは物質の原子が原子らしく存在して，その集合体としてとらえられるのに対して，プラズマは原子としての秩序がすでに乱れているから，ふつうの物質とはまるで違った物質ということができるからである。ふつうとは違ったものに対して強い関心を持つのは，自然科学者の共通な態度であ

7-3図　プラズマ

るといえる。

プラズマの状態を概念的に図に書くと〔7-3図〕のようである。これを気体にたとえると，気体の分子は電気的に中性であるから分子と分子が近づき，いわば“こつん”と衝突するまで互いに力は働かない。しかしプラズマでは粒子がみな電荷を持っているから，遠距離でも互いに力を及ぼし，押し合ったり引き合ったりする。しかし衝突によってある粒子のエネルギーは大きくなり，あるもののそれは小さくなり，これを繰りかえしてあるエネルギー分布を持つであろう。そのエネルギー分布は中性な分子のあつまりの場合とほとんど同じであろうと考えられ，実際にそうであることが観測によってたしかめられている。この分布はマックスウェルの分布とよばれ，〔7-4図〕にそれを示すが，広い範囲に分布し，分布の山の頂上よりエネルギーが少し大きいところに平均エネルギーがある。その平均のエネルギーは第3章§5で述べたように $(3/2)\,kT$ であって，T は気体や粒子の集団の絶対温度，k はボルツマンの定数である。

7-4図　マックスウエルの分布

粒子のエネルギーは運動のエネルギー $mv^2/2$ であり，これの平均がみんな $(3/2)\,kT$ に等しいから，プラズマの中で正電荷を持つ原子核は重いのでその速さは比較的に小さく，負電荷を持つ電子は軽いのでその速さは大きい。

さて核融合反応が進行するためには，〔7-2図〕の断面積からわかるように，プラズマの中の原子核のエネルギーは 10 keV を越える必要がある。プラズマの中の原子核のエネルギーは〔7-4図〕のような分布をしているので，比較的にエネルギーが大きい部分の原子核が反応を起すと考えてもよいが，ひとまず平均のエネルギーを持つものが核反応を起す役と考えよう。このようにし

てもこれからの結論は変らない。

平均の運動のエネルギーは $(3/2)kT$ とすべきであるが，習慣にしたがって kT として考えると，10 keV の平均エネルギーは温度としてどのくらいに相当するであろうか。0℃，つまり絶対温度 273°K は 0.024 eV であることを考えると，これは非常に高い温度になる。keV と絶対温度の換算は次の式になる。

$$1\,\mathrm{keV} = 1.16 \times 10^{7}\,{}^{\circ}\mathrm{K} \qquad \langle 7\text{-}7 \text{式}\rangle$$

これによると 10 keV は 1 億度，100 keV は 10 億度になる。核融合反応を持続するためには，プラズマの温度をこのように高めなくてはならない。この意味で，高温のプラズマによって進行する核反応を「熱核反応」とよぶことが多い。

7-5図 熱核反応の特性と制動放射
(反応粒子の密度 $n = 10^{15}/\mathrm{cm}^3$)

「熱」とか「高温」といっても，1億度という数字はわれわれの経験のはるかに外である。このような高温を作り，それを保持するということは，もちろんひどくむずかしい。あとで述べるように，地上で核融合反応を起すことが困難である理由のうち大きいものはこれである。

これで，プラズマの温度を仮定すれば原子核の平均のエネルギーがわかり，発生熱を与える〈7-6式〉の中の速さ v を求めることができる。次に

1 cm^3 の中の原子核の数 n_1 と n_2 をきめると発生熱を求めることができる。そこで原子核の密度 n_1 と n_2 を $n_1=n_2=10^{15}/cm^3$ として，核反応による発生エネルギーを求めたものが〔7-5図〕の曲線①と②である。横軸は原子核の平均エネルギーと，それを温度に換算したものを示してある。縦軸はプラズマの 1 cm^3 から出るエネルギーをワットで示している。曲線①は213ページの〈7-3式〉の反応について，②は〈7-1式〉と〈7-2式〉を加えたものについてのものである。これで，原子核の密度と温度がわかれば，どのくらいのエネルギーが発生するかがわかった。

なお〔7-5図〕の曲線④はプラズマの圧力である。1 cm^3 の中に2種の分子があり，その密度が $n=10^{15}/cm^3$ ならば，常温ではその圧力は1気圧の1万分の1である。しかし，その温度が非常に高いために100気圧くらいになっている。

プラズマからのエネルギー損失　プラズマの温度と密度がわかれば，発生するエネルギーがきまってくる。問題はその温度を持続できるかということである。このような高温のプラズマからは熱がどんどん逃げていくからである。

高温の物体から放射の形で熱が逃げる。放射は物質を構成している原子の中の電荷がはげしく振動するために，ちょうど放送局のアンテナの中を電子が振動して電波が出るのと同じ理屈で電磁波の形で出るものであった。いま考えているものはプラズマであるから，これから出てくる放射は，ふつうの物質の場合と違う。正や負の電荷を持つ粒子が自由に飛びまわっているからである。このときに，もっとも多くのエネルギーを放出するのは，電子が走りながら原子核に近づき，大きい引力をうけて方向を変えるときに，電荷がはげしく速さや方向を変えるときに電磁波が放射されるのと同じ原理で（第2章§8参照），エネルギーを放出することが第1に目立つ。このようにしてエネルギーを放出することを「制動放射」とよんでいる。

この制動放射を計算したものを〔7－5図〕の曲線③に示してある。プラズマの密度をやはり $n=10^{15}/cm^3$ としている。プラズマの温度が上昇するにつれて制動放射が増すが，その増し方は曲線①と②の核反応によるエネルギー放出の増し方よりもゆるい。核反応によるエネルギー放出よりも制動放射による損失が大きければ，プラズマの温度はどんどん冷えてしまう。図で見ると〈7－3式〉の反応の場合プラズマ粒子の平均エネルギーが4 keV 以下，〈7－1式〉〈7－2式〉の反応の場合 40 keV 以下では，プラズマはどんどん冷えてしまって核反応は持続しない。これ以上の平均エネルギーにしなくてはならない。温度にすれば〈7－3式〉反応では 6×10^7 °K 以上，〈7－1式〉〈7－2式〉反応では 4×10^8 °K 以上にしなければならない。

プラズマからエネルギーが失われる原因はこのほかにある。プラズマになっても，電子を失った原子がその電子の全部を失って原子核がまったくの裸になっているとは限らない。いくらかの電子を抱きかかえていれば，イオン化した原子であって，これに走っている電子が衝突すれば，このイオン化原子を励起してふつうより高いエネルギー準位にもちあげる。この励起エネルギーは電磁波の形で放出される。この損失はプラズマの中に酸素や窒素のような原子番号の大きい気体が不純物として含まれるとひどく大きくなる。このような損失もあるから，核融合反応の持続のために必要な温度は，〔7－5図〕で制動放射だけからきめたものより高くなる。

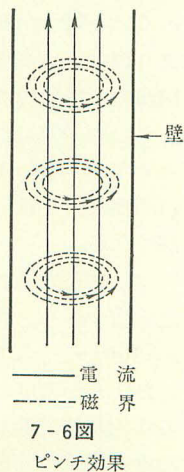
プラズマからのエネルギー損失と核反応による利得をこのように考察すると，核融合反応を起すためには，プラズマの粒子密度 $n=10^{15}/cm^3$，温度 1×10^8～1×10^9 °K を目標とする必要がある。このような密度はプラズマの持続時間を1秒程度とした場合であるが，持続時間がもっと短いときに，さらに高密度にする必要がある。持続時間を τ とすれば，$n\times\tau$ の値が核融合反応の可能性

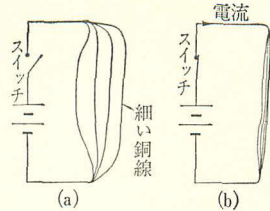
の目安とされている。

§3　核融合反応を起す――その方法

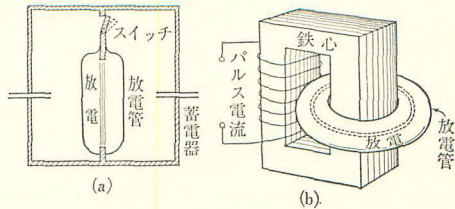
核融合反応を起すためのプラズマの温度は１億度以上である。これは重大な困難の原因である。水素や重水素のプラズマを作ろうとすれば，空中では酸素や窒素があって不可能であるから，まず真空の容器を作り真空の中に水素や重水素などを適当に入れて何らかの方法でプラズマにする。さてプラズマの温度が１億度とすると，この温度に耐える真空容器の壁が必要である。１億度になって熔けもせず，霧のように飛び散ることのない物質は存在しない。実際は 3000 度に耐える物質もなかなかないのである。その温度の１万倍以上の温度に耐える物質はとても望めない。真空容器の壁が熔けないまでも，プラズマのために温度が少しでも上って酸素のような原子番号の大きい気体を放出すると，プラズマからのエネルギー損失は制動放射の形でもイオン化原子の励起の形でも，どんどん大きくなってしまう。温度が上ったときに気体放出が少ない材料というものがなかなかない。

さらに困難なことは，〔7－5図〕でわかるように，核融合反応を起すような密度と温度のプラズマの圧力は 100 気圧くらいになる。１億度の高温と 100 気圧の圧力に耐える物質，そんなものはまずないから，ふつうの壁でプラズマを封じ込めることは不可能である。それでもなんとか必要な密度と温度のプラズマを実現しようという願いを棄てないとすると，何らかのくふうをしなければならない。そのために試みられているのは，磁界によって封じ込めようとする方法である。これも容易なことでなく，未だ成功していないが，試みら

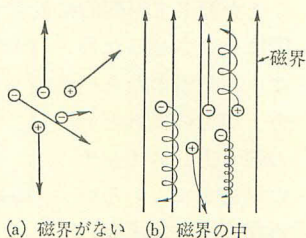
7－6図
ピンチ効果

れている方法について述べよう。

ピンチ効果　磁界を使ってプラズマを閉じ込め，壁にさわらないようにするくふうとしてまず考えられたのはピンチ効果を利用する方法であった。〔7-6図〕のように，電流が管の中を流れていると磁界を作り，その磁界によって電流の他の部分が力をうける働きで電流は互いに近よってくる。

7-7図　ピンチ効果の説明

このことは，2本の平行な針金に強い電流を流すと，電流の方向が同じならば2本の針金は引き合い，反対ならば斥け合うことで了解できる。また〔7-7図〕(a)のように，電流が流れていないときには離れている細い銅線が，電流が流れることによって，(b)のように1本にからみ合うことからもわかる。

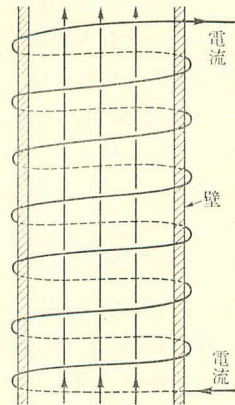
プラズマの電流が，このような働きで狭い部分にあつまる現象を「ピンチ効果」という。核融合反応を持続するには100気圧もの圧力が必要である。このような大きい圧力で拡がろうとするプラズマを抑え込むためには，強い磁界が必要である。強い磁界を作るためには，強い電流――1000万アンペアもの大電流が必要とされている。このような大きい放電電流を流す方法の例を〔7-8図〕に示してある。(a)は大きい蓄電器に貯えられた電荷をスイッチを通じて瞬間的に放電する方法である。なるべく短い時間の間に放電させるために，蓄電器のならべ方，導線の太さとその張り方，スイッチの構造まで，いろいろなくふうをする。しかし，この方法で

7-8図　ピンチ効果による放電

も未だ核融合反応を起すことには成功していない。大きい電流を流すことはできても，未だ不充分なのである。また放電は壁から離れているが，電極にはつながるわけで，プラズマの高温が電極に向って失われるおそれがあり，さらに電極からとび出す原子は大切なプラズマに入って，制動放射などの損失を大きくするであろう。(b)のような放電管を使えば，電極はないから，この困難はなくなる。この型の放電管は変圧器の２次コイルのところに，鉄心をとり巻くように置いてある。変圧器の２次コイルを短絡すれば大電流が流れるように，放電管の中に電流を流すことができる。１次コイルにはふつうの交流と違ってパルス電流を流して放電をパルス的に起す。このやり方では電極による困難はないが，放電がなかなか安定に起ってくれない。放電が横にまがったり途中でふくれ上ったり，次々と困難が起って，未だ核融合反応を起すことには成功していないのである。

ステラレーター　ピンチ効果を使うやり方は，プラズマによる電流自身による磁界を利用するのであるが，「ステラレーター」といわれるものは，そればかりでなくて，外のコイルが作る磁界の助けも借りようというものである。〔7－9図〕(a)では，磁界のないところで電荷をもつ粒子がいろいろな方向に動いている。(b)のように磁界の中では，磁界の方向に直角な運動はみんな円運動になる。磁界の方向への運動は円運動にならないでそのままであるから，図のようにネジのようなスパイラル運動になる。ちょうど磁界の方向に動いている粒子はこのまま運動していく。その結果，ほとんどみんなの粒子が磁界の方向に運動することになる。そこで，外部から充分に強い磁界を作ってやると，プラズマの電流は磁界の方向に流れることに

(a) 磁界がない　(b) 磁界の中

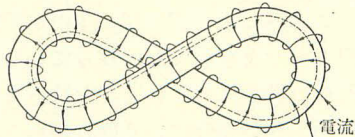
7-9図　電荷を持つ粒子の運動

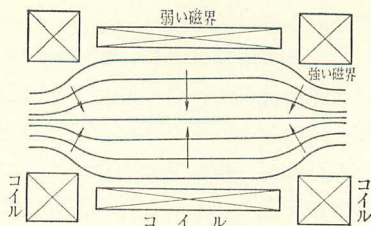
なる。

〔7-10図〕のように，壁の外のコイルに電流を流して，管の軸の方向に磁界を作ってやると，プラズマを磁界の方向にとじ込めて，壁にあたらないようにすることができる。しかし壁が円筒状では，電流は底や天井にぶつかるので，〔7-8図〕(b)のようなドーナツ状の放電管を使わねばならない。そうするともう一つの困難が出てくる。というのは，電流はだんだんと半径の大きい方に移る傾向があり，しまいにはドーナツの壁にぶつかってしまう。これを避けるために，〔7-11図〕のようにドーナツ状の放電管を8の字のようにねじるのである。こうすると磁界の方向に沿って動いていく粒子が1まわりするともとの位置にもどらない。この性質を利用してプラズマが壁にぶつかることを避けることができる。放電管を8の字にねじることは1958年以前からアメリカのプリンストン大学で行なわれていて，「ステラレーター」という名でよんでいた。

7-10図　磁界でプラズマを導く

〔7-11図〕はプラズマの道すじのための図であって，プラズマ粒子に力を及ぼし放電をはげしく成長させるのは，図には書いてないが，〔7-8図〕(b)のような変圧器の原理を使うものが多い。

さて，これでうまくいくかというと，そうでない。やはり，プラズマの粒子密度が充分に成長する前に不安定が起る。不安定の種類はピンチ効果を利用する場合と同じようなものである。

磁気鏡の方法　いままで述べた方法では，プラズマが壁にぶつかることを避けるため

7-11図　8の字型放電管

に，ドーナツ状の放電管を使った。これと違って磁気鏡の方法というのは，プラズマ電流が環にならないで，しかも壁にぶつからないでもどり，往復運動させるものである。壁ではなくて，磁界の強弱をくふうして，プラズマを押しかえそうというのである。

7-12図　磁気鏡の方法

〔7-12図〕は磁気鏡の方法を示している。中央に弱い磁界のところを作り，両端のコイルを大きくし，大きい電流を流して磁界を強くする。そうすると磁界の方向は図のような形となる。電荷を持つ粒子が動くと，磁界の方向に直角な力をうけるので，図のように両端では粒子を中央に向って押すと同時に，いままで走ってきた方向にもどそうとする力が出る。それで，図の水平方向の速さがあまり大きくないものは押しもどされる。つまり鏡のように反射されるので「磁気鏡」というのである。磁気鏡の働きは左右の両端で行なわれ，プラズマのある部分はこの間にとじ込められることになる。このありさまで磁界を大きくして，プラズマを中心部分に押し込めたり，外部からエネルギーの大きい粒子を打ち込むなどの方法で，プラズマの温度を高くして核融合反応を起そうというのである。

アメリカの「DCX」，ソ連の「オグラ」とよばれている装置はこの型に属する。

この型でも，〔7-12図〕の水平方向の速さの大きい粒子は逃げ出してしまう。また，残っている粒子が衝突し合っていると，どれかの粒子は大きい速さを持ってマックスウェル分布のエネルギーの大きい部分にいく機会があり，これは逃げ出してしまう。このために，プラズマの温度や密度を余裕を持って少し大きめにす

る必要があるといわれている。このような磁気鏡の方法も勉強している段階で，核融合を起すことには未だ成功していない。

核融合反応の将来　核融合反応を起すために充分なプラズマの密度と温度を作り出すことは今のところむずかしいことを述べてきた。目標は，温度 $10^8 \sim 10^9$ °K，密度 n と持続的間 τ をかけたもの $n\tau \sim 10^{15}$ であるのに，現在，世界でもっとも調子のよいもので温度 $10^7 \sim 10^8$ °K，$n\tau \sim 10^{13}$ である。

さて，いまのところ核融合反応の成功というゴールに到達することが容易であると考えている人はほとんどいない。これについて有名な話は1955年にインドのバーバ（Bhabha, 1909 年生まれ。数年前飛行機事故で死去）は，ジュネーブで開かれた第1回原子力平和利用国際会議の議長として，核融合反応は20年後には実用になるであろうと演説したことである。これを機会に，米，英，ソ連などの国で，核融合反応を極秘のうちに研究していたものを公開するようになった。3年あとの1958年に第2回の会議を開き，各国の研究者が話し合ってみると，これはかなりむずかしいものであることを認め合ったという。バーバの言ったのは「1955年から20年という意味ではなかったはず」という口の悪い人もいる。

余談はさておき，いつの日にか核融合反応が実現したとして，そのとき，発生したエネルギーをわれわれの生活に役立てる方法を考えてみよう。

核分裂反応による原子炉では，分裂片のエネルギーを温度に換算すると 10^{11} °K というようなたいへんな高温であるが，これが核燃料の中を走ってその中の原子にエネルギーを与えても，小きざみに与えるので，燃料自身の温度は何百度とか何千度とか，われわれが取り扱うことができる温度に保つことができ，これから熱をとり出すことができる。

核融合反応では，燃料自身の温度が1億度になる。これに冷却

材を接触させて熱をとり出すことはできない。冷却材が蒸発するどころか，それを越えてプラズマになってしまう。核融合反応から出る強い放射をうけとめて熱をとり出すより仕方ないであろう。このほか中性子も発生する。このエネルギーをうけとめる必要がある。つまり放射や中性子の形式でとび出すエネルギーをとり出すくふうをしなければならない。そのために，たとえば発電をするとすれば非常な大型なものになるとされている。

一方，核融合反応では電荷を持つ粒子がとびまわるので，〔7-9図〕(b)のようなスパイラル運動を利用して直接に電気エネルギーをとり出すことの可能性も議論されている。核融合反応から直接に発電するわけである。

直接に発電するにしても，放射や中性子のエネルギーを利用するにしても，今までにない技術の開発が必要である。核分裂反応の利用においては，熱中性子炉の利用だけではエネルギー資源が心もとないので，増殖炉を開発してエネルギー資源を100倍以上のものとしたいと考えられていることはすでに述べた。増殖炉の試運転はすでに成功しているのに，炉心の温度が今までより高く，冷却材に特殊なものを使うというだけのために，これから開発研究をしなければならないことは山ほどある。これに比較すると，核融合反応の方は，成功すれば人類のエネルギー資源は文字通り無尽蔵となるにしても，開発すべき技術の分量は気が遠くなるほどであるというか，どのくらいあるか見当がつかないというべきである。

科学技術の歴史を見ると，見当がつかないくらいむずかしいことが可能になることがよくある。核分裂の利用ばかりでなく，真空管やトランジスターの発明も，それまでは可能か不可能か見当もつかないことを可能にしている。ラザフォードがなくなる前に，原子核エネルギーが人間の生活に貢献することはあるまいと言ったというが，そのあと，2, 3年のうちに核分裂が発見されて，現

在の原子力の利用が可能になっている。自然科学の幅広い研究のどこからか，思わぬ研究あるいは技術開発が行なわれて，現在の困難をふきとばすことが将来あるかもしれない。自然科学の歴史は，そのような思わぬ発見は自然科学の広い範囲に求めるべきであることを示しているように思われる。現在核融合をめざして盛んに行なわれているプラズマの研究はもちろん大切なものであるが，他の範囲の研究から，思わぬ成果が出る可能性もあることに留意すべきであろう。

§4　天体における核融合反応

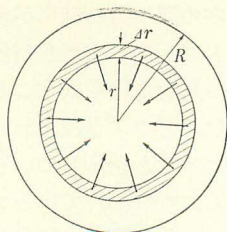
繰りかえして述べてきたように地上で核融合反応を起して，エネルギーをとり出すことはいまのところむずかしい。しかし天体の中心では核融合反応が起っていて，太陽ではそれがエネルギーの源になっている。太陽くらい大きい天体では，その中央の部分は密度が大きく，温度の高いプラズマになっていて核融合反応が可能になっている。

地上で核融合反応を起すためには，高温に耐える容器の問題が重大であった。しかし天体では中心で核融合反応の起っている部分の外側にプラズマ状態の物質があり，その外に，熔けてはいてもふつうの状態の物質があるというように，連続的につながっているから，容器の心配もない。中央の部分は，天体の中の物質同士の間に働く万有引力によって非常な圧力で周囲から押えられているから，核融合反応を起したプラズマがとび散る心配もない。地球も天体の一つであるが，地球は小さいためにその中心でも核融合反応は起らない。次に太陽と地球の違いをもっとくわしく考えてみよう。

太陽と地球　核融合反応が，太陽の中心では起り，地球の内部では起らないのは，大きさと質量の違いによる。太陽と地球の質量と大きさは次のようである。

	質量 (M)	半径 (R)
〔太陽〕	2.0×10^{30}kg	6.96×10^{5}km
〔地球〕	6.0×10^{24}kg	6.4×10^{3}km

7-13図　万有引力は天体の中心に圧力を作る

天体の中心の圧力と温度を推定すれば，核融合反応が起るかどうかわかる。〔7-13図〕で天体の半径をRとし，内部の半径rのところで厚さ Δr の球殻を考える。この球殻の中の物質がその外側にある物質からうける万有引力を数学を使って加え合わせると消しあってしまう。それで球殻の中の物質からうける万有引力だけが残る。この引力で球殻の内部を押すから圧力が大きくなる。

いま，粗っぽい近似であるが，天体の密度が一様であるとしよう。この仮定によって出てくる結果は真実とは違うであろうが，ものごとの見当をつけるために役に立つ。一定の密度をρとすれば $\rho=M\Big/\frac{4\pi}{3}R^3\,\mathrm{kg/m^3}$ となる。球殻の質量は $\rho4\pi r^2\Delta r$ である。球殻の内側の質量は $\frac{4\pi}{3}r^3\rho$ であるが，この質量が中心にあつまったと同じような力を球殻がうけるから，球殻がうける力は，

$$\Delta F = G\frac{\frac{4\pi}{3}r^3\rho\times\rho4\pi r^2\Delta r}{r^2} = G\frac{4\pi}{3}r\rho^2\Delta r\times4\pi r^2$$

となり，この力が面積 $4\pi r^2$ に働くから，圧力は，

$$\Delta p = \Delta F/4\pi r^2 = G\frac{4\pi}{3}r\rho^2\Delta r$$

となる。これを中心から周辺までの球殻について加えると中心の圧力となる。この圧力を太陽と地球について求めると，

〔太陽の中心の圧力〕	〔地球の中心の圧力〕
2.5×10^{14} ニュートン/m^2	5.5×10^{11} ニュートン/m^2
$=2.6\times10^{9}$ 気圧	$=5.6\times10^{6}$ 気圧

となる。たいへんに大きい圧力である。これは密度が一定とした

もので，これは乱暴な仮定である。実際は中心の密度が大きいために，圧力はここで計算したものは違ったものになる。

一方，温度と圧力との関係は次のようになる。$1m^3$ の中に粒子が n 個あり，粒子の質量が m，速さの2乗の平均が $\bar{v}^2$ であれば，気体運動論によると圧力 p は，

$$p=\frac{1}{3}mn\bar{v}^2 \qquad \langle 7-8 \text{式} \rangle$$

となる。粒子群の温度を T とすれば〈3-15式〉によって，
$(1/2)m\bar{v}^2=(3/2)kT$ であるから，

$$p=nkT \qquad \langle 7-9 \text{式} \rangle$$

となる。太陽も地球もその密度が部分によって変らないと仮定すれば，中心での粒子密度 n を求めることができる。中心の粒子はみんな陽子であると仮定すると，〈7-9式〉によって圧力から温度を求めると次のようになる。

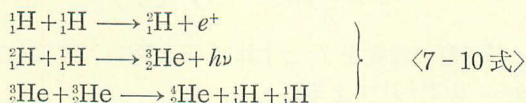
	陽子の密度	温度
〔太陽〕	$10^{30}/m^3 = 10^{24}/cm^3$	2×10^7 °K
〔地球〕	$4\times10^{30}/m^3 = 4\times10^{24}/cm^3$	10^4 °K

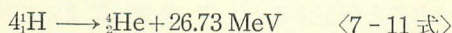
太陽などでは密度が周辺と中心では大きく変っているために，実際の密度はこの100倍くらいになっている。しかし太陽と地球とを比較して次のことがいえる。中心の密度は太陽と地球ではあまり違わないが，温度には大きい違いがある。この違いは太陽の質量が大きくて中心の圧力が大きいことからきている。粒子密度も温度も，§2で核融合反応について考えたものとは違う。しかし，太陽と地球の中心の温度の違いから，太陽の中心では核融合反応が可能であり，地球の中心では不可能であるとしてもうなずけることである。

地球の中心で核融合反応が起らないと同じように，他の惑星や月の中心でも起らない。また太陽のような大きい天体では核融合反応が可能であっても，その大きさによって圧力と温度が違うか

ら，進行する反応の種類と速さに違いがあるであろう。それによって星の活動状態に違いが出てくることになる。

陽子－陽子チェイン　太陽の中心の密度や温度では，次のような一連の反応によって水素がヘリウムに変化しているとされている。太陽の中心の物質の大部分が水素であるから，この反応が起るわけである。

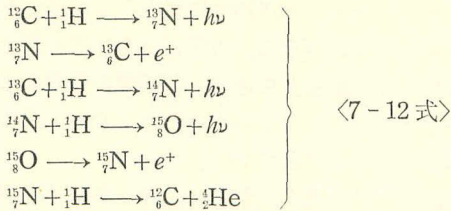
$$\left.\begin{array}{l} {}^{1}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H}+e^{+} \\ {}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}+h\nu \\ {}^{3}_{2}\mathrm{He}+{}^{3}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \end{array}\right\} \quad \langle 7-10\text{式}\rangle$$

この一連の反応を「陽子－陽子チェイン」とよんでいる。陽子－陽子チェインでは結局水素がヘリウムになったもので，次のように書くことができる。

$$4{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}+26.73\,\mathrm{MeV} \qquad \langle 7-11\text{式}\rangle$$

陽子－陽子チェインが進行する速さについて，もっとも大きい隘路は最初の水素から重水素ができる反応である。陽子と陽子の間のクーロン障壁は小さいので比較的に低温でも反応が進むとしても，それでもこの反応の進行はおそい。一つの水素がこの反応を起す確率は100億年に1回くらいである。それでも，陽子－陽子チェインの進行によって莫大なエネルギーが発生するのは，太陽に存在する水素の量が莫大であるからである。

太陽に存在する水素が燃え切ってしまうには100億年かかるとされている。太陽は生まれてから約50億年と思われているから，これから50億年は太陽の燃料は大丈夫ということになる。

炭素サイクル　ある天体では，温度や密度が太陽よりやや大きいと，次のように，「炭素サイクル」とよばれている一連の反応が起るとされている。わずかに存在する炭素を触媒のようにして反応が進んでいく。この炭素サイクルはアメリカのベーテと西ドイツのワイチェッカーによって提案されたものである。この反応では炭素などと水素原子核の間のクーロン障壁が〈7－10式〉の

反応より大きいから，炭素サイクルは陽子－陽子チェインよりも高温が必要である。

$$\left.\begin{array}{l} {}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{13}_{7}\mathrm{N}+h\nu \\ {}^{13}_{7}\mathrm{N} \longrightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C}+e^{+} \\ {}^{13}_{6}\mathrm{C}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N}+h\nu \\ {}^{14}_{7}\mathrm{N}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{15}_{8}\mathrm{O}+h\nu \\ {}^{15}_{8}\mathrm{O} \longrightarrow {}^{15}_{7}\mathrm{N}+e^{+} \\ {}^{15}_{7}\mathrm{N}+{}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C}+{}^{4}_{2}\mathrm{He} \end{array}\right\} \quad \langle 7-12\text{式}\rangle$$

この一連の反応は結局のところ〈7－11式〉と同じように，4個の水素が1個のヘリウムに変化してエネルギーを放出している。

陽子－陽子チェインにしても炭素サイクルにしても，結局ヘリウムが作られる。このヘリウムが衝突してさらに重い原子核に結合していくためには，さらに高温が必要である。

さて，約50億年たって太陽の中心部の水素が燃えつきたときにはどうなるだろうか。熱の発生がないから温度は下り，圧力が下るために太陽の物質は中心を目がけて沈んでいく。一方，周辺部では炭素サイクルの反応が起って温度が上り，全体の温度が一様になる。その結果，周辺部が稀薄になり，非常に広い範囲に広がる。推定によると，金星あるいは地球のあたりまで広がってくるとされている。このときは，温度が比較的に低いので，赤い色の光を出し，形が大きいので「赤色巨星」とよばれる。

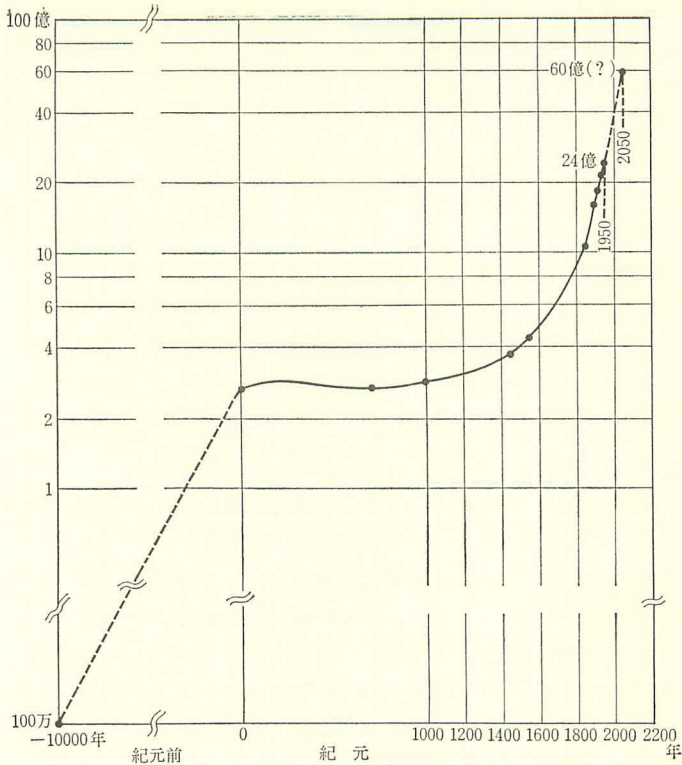
赤色巨星の状態で，物質の一部を遠方に吹きとばすことがある。これは新しい天体になる。一方，中心に沈んでいった物質は温度と密度が大きくなる。温度が1億度くらいになるとヘリウムが融合して重い原子核になる。このときには炭素その他の重い原子核が作られていく。温度がさらに上って40億度くらいになると，われわれの知っているほとんどすべての原子核が作られ，〔3－41図〕の結合エネルギーのもっとも大きいものが，もっとも多量に存在している。核融合反応がこのありさままで進展すると，天体

の中心ではふたたび熱の発生がなくなり，質量は中心に向って落ちていく。そして万有引力の位置のエネルギーは熱に変化して温度が上る。このとき天体の周辺に燃料となる原子核が未だ残っていれば，爆発的に反応が進み，太陽よりもひどく輝きの大きい星になる。これが「超新星」である。超新星の爆発のときには，多量の中性子が発生して，ウラニウム，トリウムなどのもっとも重い原子核が作られるとされている。

このように，天体の進化と活動は，原子核反応と深い関係がある。原子核反応をエネルギー源と考えて，天体の活動が説明できるわけである。一方，太陽は，われわれの地球の温度を保つ熱源となり，また植物が育つエネルギー源になっている。このようにわれわれの生活に深い関係のある太陽の熱源は原子核反応であって，原子力とよんでもよいものである。

§5　世界のエネルギー資源

核分裂反応も核融合反応も，世界のエネルギー問題に深い関係があるので，ここでエネルギー資源について簡単に述べよう。エネルギー問題の将来を考えるためには，将来，人類がどのくらいのエネルギーを必要とするか，また，天然にどれだけのエネルギー資源があるかを推定しなければならない。これを正確に行なうのは容易なことではない。以下主としてパトナム氏（P. C. Patnum ; Energy in the Future, 邦訳『エネルギー問題の将来』吉崎英男訳，商工出版刊）によって説明しよう。

世界人口とエネルギー消費量　パトナム氏はまず世界人口の将来の推定を行なっている。〔7 - 14 図〕はその結果であって，過去の世界人口をしらべ，その変化と社会的要因とを比較し，将来の社会的問題を想像している。世界の人口の変化をみると，紀元前1万年には約100万と推定されているそうである。それが紀元1年には約2.7億となり，紀元1300年頃まで変化しなかったが，そ

7-14図　世界人口のうつりかわり(パトナムによる)

のあと増加の傾向が著しい。1300年はいわゆる文芸復興のときにあたる。そのあと1600年から1700年にかけて，人口増加の傾斜が大きくなっている。この頃は実証的な近代科学が発達したときに相当する。1900年になると，さらに増加の傾斜は大きく，1950年には約24億になっている。この曲線を簡単に延ばせば世界人口は2050年には50億ないし80億となる。これをさらに正確に予測することは不可能だとパトナム氏は述べている。これ

から行なうエネルギー需要の予測では，2050年に世界人口は60億となるとしよう。

さて，この人口が1人あたりどれだけのエネルギーを消費するかを知れば，エネルギーの需要がわかる。〔7-15図〕は世界の人類がその年までに消費したエネルギーの量を加えたものを示している。

7-15図　世界のエネルギー消費の加算量

＊1人あたりの消費量は1年に3％ますとする

＊2050年の世界人口は60億とする（パトナムによる）

人類は1860年までに，9Qだけのエネルギーを消費したとされている。ここにQというのはエネルギー問題を論ずるときによく使う単位であって，

$$1\,Q = 10^{18}\,\text{Btu (British Thermal Unit)}$$

$$1\,\text{Btu} = 2.9\times10^{-4}\text{kWh} = 1.06\times10^{3}\ \text{ジュール}$$

$$1\,Q = 2.9\times10^{14}\text{kWh} = 1.06\times10^{21}\ \text{ジュール}$$

によってきめられている熱量である。

1860年頃は世界で100年に1.0Qくらいを消費していた。ところがそのあと100年，つまり1950年までに4Qも消費していて，そのときの傾斜では100年に10Qの割合になっている。

1950年以後の約100年間の推定については，次のようにしている。まず世界人口は2050年には60億になるとする。また，1人あたりのエネルギー消費量は1年あたり3％だけ増すとする。そうするとエネルギーの需要量を加算したものは図の点線となり，

2050年には100 Q に達する。これによると1950年から2050の100年間に用意しなければならないエネルギーは約85 Q である。実に1950年までに人類が消費した全エネルギー13 Q の7倍に近い。

さてこれだけのエネルギーがどこに用意されているだろうか。

エネルギー資源　エネルギー資源としては，まず石油，石炭，木材，水力発電などが考えられる。この中で，石油，石炭などは地下に貯えられていて，消費すればなくなってしまうものである。しかし，木材，水力発電などのエネルギーでは事情が違う。木材は切りとってからあとで植林などによって育てることができるし，水力発電では，高地に雨が降ることが繰りかえされる限り，いつまでも利用できて，なくなってしまうことはない。石油などをパトナムは資本エネルギーとよび，木材などを所得エネルギーとよんでいる。

〔7-1表〕は石炭などの資本エネルギーの世界における埋蔵量を示すものである。石炭の埋蔵量については，1913年に開かれた第12回万国地質学会議で推定されたのがはじめてのことで，世界には180 Q に相当するものが埋蔵されているとされた。しかし，この中で採掘可能なものがどれだけあるかという推定が，そのあとで行なわれた。〔7-1表〕は現行価格の2倍以下で採掘できるものをあつめたものである。石炭，石油，頁岩，タール砂を加えて，エネルギー量として27 Q になっている。このような推定はむずかしいので，不正確な面があることはやむを得ないとしても，27 Q では，これから100年の間に必要な85 Q に対してたいへんに不足であることは明らかである。

石　　炭	21.0 Q
石油・天然ガス	5.0
油 母 頁 岩	1.0
タ ー ル 砂	0.2
合　　計	27.2

7-1表　採掘可能な埋蔵量

* 現行価格の2倍以下で採掘可能なもの。パトナムによる

次にパトナムのいう所得エネ

ルギーについて考えよう。〔7-2表〕は太陽熱利用などの所得エネルギーをこれからの100年間にどのくらい利用できるかを示したものである。

エネルギー源	100年間の世界生産
太陽熱利用	5 Q
燃材	1.4
農産廃物	1.0
水力	0.6
風力	0.1
太陽熱利用発電	0.05
熱帯水域の温度差	0.05
合計	8.2

7-2表 所得エネルギー源
(パトナムによる)

これらのエネルギーは直接または間接に太陽から来るエネルギーに関係している。太陽から地球に到達するエネルギーは1年間で,

地球の外圏に到達する分	5,300 Q
地表まで到達する分	3,200 Q
陸地面に到達する分	840 Q

という莫大なもので,陸地に到着するものは年間840 Qになる。もしも,これの全部を人類のために利用することができれば,100年間には84000 Qとなって,これからの100年間の不足分の1000倍にもなる。残念なことに太陽エネルギーの利用効率はたいへんに低いもので,〔7-2表〕のように100年間に利用可能なものは全体で約8 Qであるから,利用率は1万分の1にすぎない。

〔7-2表〕のうち,太陽熱利用は,水を温めたり炊事したり,または暖房に利用するもので,これが100年間に5 Qになると推定している。燃材は木材などを燃焼するもので,農産廃物の中には牛糞の利用も入っている。これらのものは農畜を主業とする人たちがよく利用するものであるが,広く考えると,太陽エネルギーによる同化作用によって植物に貯えられた繊維などの含水炭素を燃やしているものであるか,または植物を食べた動物の排泄物などを利用しているわけで,出発点はみな太陽エネルギーである。そういえば,〔7-1表〕の資本エネルギーの中の石油や石炭なども過去の動物や植物が堆積し変化したものであるから,これも過

去の太陽エネルギーによって生まれたエネルギーである。

太陽熱が同化作用によって植物や動物のエネルギーに変化しているのは，地上に到達している太陽エネルギー 840 Q のうち 0.4 Q だけであるとされている。この効率をあげるためには植物の改良，植林計画の改善などが必要であろうが，その一つの方法として特殊な緑藻（クロレラ）の栽培が考えられている。クロレラの特殊な品種をさがしあてれば，画期的に太陽熱利用の効率をあげることができるであろう。しかし，現状では，クロレラ栽培はエネルギー資源としてははなはだ高価である。

3番目の水力発電はエネルギーとしては比較的にわずかである。これらを加えて，所得エネルギーは 8.2 Q となる。しかしパトナムはこれだけの所得エネルギーをこれからの100年間に利用しようとすれば相当のコスト高になるであろうとしている。

核燃料への期待　資本エネルギーと所得エネルギーを加えて 35 Q であり，これからの100年のためには 50 Q が不足している。このようなわけで核燃料に期待があつまる。

核燃料としては，1 kg 200 ドル以下の費用で採掘できるものとしてウラニウム2500万トン，トリウム100万トンが埋蔵されていると推定されている。ウラニウムが大部分であるから，ウラニウムだけについて考える。この中に 0.7 % 含まれている ^{235}U だけを核燃料として利用できるとし，しかも実際には効率を考慮してその中の 1/3 だけが利用できるとしてみる。〈5-15式〉によって 235 g の ^{235}U から 1.87×10^{13} ジュールのエネルギーが出る。それで2500万トンのウラニウムからとり出せるエネルギーは，

$$\frac{2.5\times10^{7}\times10^{6}\times0.7\times10^{-2}\times\frac{1}{3}}{235}\times1.87\times10^{13}=4.6\times10^{21}\text{ジュール}$$
$$=4.3\,Q$$

となる。これではこれから100年のエネルギーとしてはたいへん不充分である。

このために増殖炉によって ^{238}U の利用が有効になる。増殖炉に成功すれば，2500万トンのウラニウムの99.3％の ^{238}U が利用できるので，^{235}U の場合と同じ計算をすれば，

$$4.3\times\frac{99.3}{0.7}=615\,Q$$

のエネルギーが得られる。これはこれからの100年の不足分にとって充分なばかりでなく，石炭の埋蔵量の30倍，石油および天然ガスの100倍になっている。

これで，これからの100年はエネルギーについては安心といえる。ただし増殖炉の技術にわれわれ人類が成功する必要がある。成功の見込みはあるといえるが，科学者と技術者は大きい努力をしなければならぬであろう。

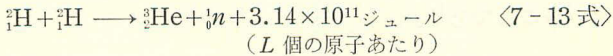
これからの100年間の人類のエネルギー収支計画の試案の一つは〔7-3表〕になるであろう。これでは核燃料の埋蔵量の約1/10を利用することになる。それにしても増殖炉による ^{238}U の利用を行なう必要がある。もう一つ，このエネルギー計画が持っている注意すべき面がある。それは石油，ガソリンなどの地下燃料に依存している自動車，船，暖房などを，電化するか，または核エネルギーを直接に使用するように変換する必要があることである。船の大部分は原子力船になり，交通機関も大幅に電化する必要があろう。このようにエネルギーの利用形態にも変化が起り，そのための技術開発も必要であろう。つまり，将来のエネルギー革命にともなって，工業技術のすがたも一変するであろう。

核融合反応に成功すれば　増殖炉に成功すれば，人類のこれからの100年間のエネルギー計画はなんとかなり，さらに余裕があることがわかった。その上にもしも核融合反応に成功すれば

支出		85 Q
収入	地上所得エネルギー	10 Q
	残存地下燃料	20 Q
	核燃料	55 Q

7-3表　1950～2050年のエネルギー収支

どうなるであろうか。核融合反応としては重水素による〈7-1式〉の反応を代表として考えよう。〈7-1式〉は L 個の原子あたりとして次のようになる。

$$^{2}_{1}\mathrm{H}+^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{3}_{2}\mathrm{He}+^{1}_{0}n+3.14\times10^{11}\text{ジュール} \quad \text{〈7-13式〉}$$

（L 個の原子あたり）

この場合 L 個の原子あたりというのは，$^{2}_{1}\mathrm{H}$ と $^{2}_{1}\mathrm{H}$ の反応であり，二つの $^{2}_{1}\mathrm{H}$ が関係するので重水素 4g あたり 3.14×10^{11} ジュールのエネルギーが出ることになる。

さて地球上の水の中には，重水素は水素の割合にして 1/6500 だけ含まれている。しかし地球上の水の量が莫大であるから，地球上の重水素の量は 10^{14}ton と推定される。これだけの重水素について核融合反応を起すことに成功したときに出てくるエネルギーは，

$$\frac{10^{14}\times10^{6}}{4}\times3.14\times10^{11}=8\times10^{30}\text{ジュール}$$

$$=7\times10^{9}\,Q$$

という，なんともすごいものになる。核融合反応を起すために必要な温度もわれわれの常識を越えていたが，これに成功したときにあらわれるエネルギーの分量もわれわれの常識を越えている。

これからの 100 年間に人類は 85 Q を使うとしているので，この調子でいくとすれば，なんと1億年は大丈夫ということになる。

しかし，こんな遠い将来には，地球上の人口はどうなるか，1人あたりのエネルギーの消費量はどうなるか，まったく見当がつかないであろう。とにかく，われわれが核融合反応の利用に成功すれば，人類の生活は非常に大きな変化をうけるであろう。核分裂の利用の成功，つまり「原子力」によって現在うけている影響とはくらべものにならない影響をうけるに相違ない。

また，こんなに遠い将来のことならば，物理学やその他の自然科学の思わぬ発展によって，意外に好都合で分量の多いエネルギ

ー源が発見されるかもしれない。原子核物理学が発展した素粒子物理学から何が生まれるか，それはまだわからない。言いかえると，エネルギー革命は常に自然科学の進歩とともにすすむであろうということである。

第8章　放　　射　　線

§1　放射線の種類

世界のどこかで核爆発が行なわれると，大気が放射能で汚染され，それが地上に落下してくることがよく問題になる。このときに放射能といっているのは，放射線を出す物質のことをいっているのである。やかましくいうと，放射能を持つ物質といった方が正しいのだが，略して放射能といっている。

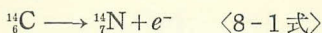
放射線というのは，一般に，電子，陽子，α-粒子などの粒子が，相当の速さで走っているものをいう。これらの物質が空気などの気体の中を走ると，気体の分子をイオンにする。また，固体の中を走ると，固体の中の原子の性質を変えたり，原子の配列を変えたりするために，固体の性質が変化する。このために写真乾板に感光と同じ働きをしたり，生物体の中に入ると，細胞の働きを変えたり，遺伝素質を変えたりする。

X-線，γ-線，それから中性子も放射線の仲間に入る。これらのものは，それ自身ではイオン化作用はないが，γ-線とX-線は，原子の中から電子を打ち出して，その電子がイオン化作用を持つ。中性子もそれ自身ではイオン化作用はないが，陽子などに衝突してそれをつきとばしたものがイオン化作用を持つ。

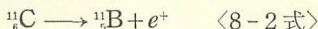
また，パイ中間子，ミュー中間子などの素粒子が走りまわっているものも放射線である。

β-線　放射線の粒子はそのエネルギーをどこかでもらってくる。まず β-線について考えよう。中性子を余計に持ちすぎている原子核は次の例のように電子を打ち出し，原子核の中の1個の中性

子が陽子に変化する。

$$^{14}_{6}C \longrightarrow ^{14}_{7}N + e^{-} \qquad \langle 8\text{-}1\text{式}\rangle$$

(半減期 5680 年)

中性子が少なすぎる原子核は次の例のように陽電子を打ち出し，原子核の中の1個の陽子は中性子に変化する。

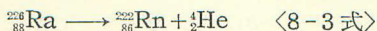
$$^{11}_{6}C \longrightarrow ^{11}_{5}B + e^{+} \qquad \langle 8\text{-}2\text{式}\rangle$$

(半減期 20 分)

〈8-1式〉や〈8-2式〉のようにして出てくる電子や陽電子を β-線とよんでいる。β-線のエネルギーは原子核から打ち出されたものである。原子核から β-線が出るときに，中性微子といって質量も電荷も持たない粒子が同時に出て，原子核から出るエネルギーは電子とこの中性微子との間に分配される。中性微子については，これ以上ふれないことにする。

β-線のエネルギーは半減期に関係していて，半減期が小さいほどそのエネルギーは大きい傾向がある。半減期が 0.01 秒くらいのものでは β-線のエネルギーは 10 MeV の程度であり，半減期が 1000 年くらいのものでは 0.1 MeV の程度である。

電子は，原子核の中のエネルギーをもらわなくても，加速器を使って電気的にエネルギーを与えてもよい。現在では，線形加速器やベータートロンによって，天然の β-線よりもはるかにエネルギーの大きいものが作られ，その最大エネルギーは 20000 MeV に達している。また強度も大きい。これらのものは β-線とか，放射能などとよばないで，電子線とよぶ。放射線であることに変りはない。

α-線　α-線はヘリウム4の原子核である。ラジウムなどの重い原子核では，次のように α-粒子を打ち出す。

$$^{226}_{88}Ra \longrightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He \qquad \langle 8\text{-}3\text{式}\rangle$$

(半減期 1602 年)

このような原子番号の大きい原子核では，その中に陽子の数が多

いために不安定になり，α-粒子を打ち出して崩壊する。崩壊する速さは，原子核の不安定さにもよるが，ラジウムの場合には，半減期1602年の割合で打ち出す。半減期の小さい場合のα-粒子のエネルギーは大きく，半減期が大きいとエネルギーが小さい傾向がある。といってもエネルギーは大きくても5〜10MeVくらいまでである。

α-粒子も加速器を使ってエネルギーを与えることができる。現在ではサイクロトロンなどによって，50 MeVまでのものが作られ，強度も，天然の放射性同位元素から得られるものよりもはるかに強い。

γ-線 原子核がβ-線やα-線を出して崩壊し，違う原子核になったときに，新しい原子核が基底準位でなく，励起準位に残ることがある。そしてこの励起準位が基底準位に落ちるときに励起のエネルギーはγ-線として放出される。したがってγ-線は，β-線放出やα-線放出にともなって出てくる。

天然の放射性同位元素から出てくるγ-線のエネルギーは0.1 MeVから2MeVの間のものである。γ-線も人工的に作ることができる。電子を物質に打ちつけてX-線を出すと同じようにすればよいので，20000 MeVの電子を物質に打ちつければ，最大20000 MeVまでのγ-線が出る。ただしこのときのエネルギーは一様でなく，連続分布になっている。

天然の放射性同位元素が陽子や中性子を打ち出す例は，少ないけれども，実在する。核分裂のあとの分裂片にその例があり，原子炉の運転に関係のある遅発中性子がその例である。

陽子も加速器によって人工的に加速することができる。陽子は加速器によってもっとも高いエネルギーにされている粒子で，現在の最高はソ連の加速器によって作られている70000 MeVのものである。

§2 放射線を測る

放射線を測るのに二つの立場がある。その一つは，いまここに放射線が到達して，空気をイオン化するとか，固体に影響を及ぼすなどで，どのくらいの強さの働きをしているかを測る立場である。もう一つは，放射性同位元素がどのくらい活発に活動しているかを測る立場である。後者は同位元素の「放射能」の大きさをしらべるといった方がふさわしい。

放射能を測る　放射性同位元素が四方八方に β-線や α-線をとび出させている数は，もちろん放射性同位元素の分量に比例して増加する。同じ分量でも，1秒間に放射線を多く出す，つまり1秒間に崩壊する数の大きいものは，多くの放射線を出す。1秒間に崩壊する分量は半減期に逆比例するのは当然である。

そこで，放射性同位元素の分量を m とし，半減期を T とすれば，放射能は m/T に比例し，

$$\text{放射能} \propto \frac{m}{T} \qquad \langle 8-4\text{式}\rangle$$

となる。m/T が同じならば，1秒間に崩壊する原子核の数は同じであるから，放射能は同じであるということができる。それで，何かの例を標準にとって放射能の単位にすることができる。この単位としては，1gのラジウムの中で1秒間に崩壊する数をえらぶ。これを「1キューリー」といい，「1 Ci」であらわす。

1キューリーの放射能のときに，1秒間に崩壊する原子核の数を求めてみよう。ラジウムの原子量は226であるから，1gの中にある原子核の数は，

$$\frac{1}{226}\times 6.02\times 10^{23} = 2.66\times 10^{21}$$

である。これの半分が1602年の間に崩壊したとすると，1秒間にこわれる数は，

$$\frac{1.33 \times 10^{21}}{1602 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 2.62 \times 10^{10}$$

となる。しかしこれは1602年の間一様に崩壊するときの数である。崩壊する数はそのときに存在するラジウムの量に比例するから，1g のときは半減期のあとで 1/2g になったときよりもたくさん崩壊している。この点を考慮すると，1キューリーのときに1秒間に崩壊する数は

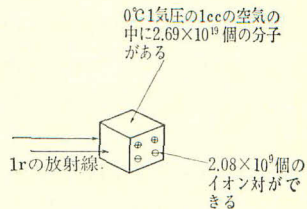
$$1\,\mathrm{Ci}\ \text{の崩壊数} = 3.70 \times 10^{10}/\mathrm{sec} \qquad \langle 8\text{-}5\,\text{式} \rangle$$

となる。

半減期がラジウムのそれよりも小さい放射性同位元素では，少ない分量で1キューリーとなる。たとえば半減期28年の ^{90}Sr では (28/1602)=0.0175 g で1キューリーとなる。

1キューリーの1000分の1を1ミリキューリー (1 mCi)，100万分の1を1マイクロキューリー (1 μCi) という。

放射線の作用を測る　放射線が到着しているときにその作用を測るためには，まずそのイオン化作用を見る。〔8-1図〕のように，空中を放射線が走っているときに，その 1 cm³ の中に作るイオンの数を考えよう。空気が 0°C で1気圧ならば，1 cm³ の中に 2.69×10^{19} 個の分子がある。この中から，2.08×10^{9} 個の正と負のイオン対が作られたときに，その放射線の分量を1レントゲンといって1r であらわす。この分量は空気にあたった放射線の分量であるから，「照射線量」とよぶ。

照射線量が 1r のときに，空気 1 cm³ の中でできるイオンを電荷であらわすと，電子の電荷にイオンの数をかけて，3.33×10^{-10} クーロンとなる。この分量は電磁気学でいう1静電単位である。

8-1図　1rの放射線の作用

一方，生物体などの固体の中での

放射線の作用を考える必要がある。放射線が物体を通過してその 1g の中で100エルグ（1エルグは 10^{-7} ジュール）のエネルギーが吸収されたときに「吸収線量」が1radであるという。

放射線の種類	RBE
X-線，γ-線，β-線	1
遅い中性子	1〜2
速い中性子，陽子	2〜5
α-粒子	5〜10
重い原子核	10〜20

8-1表　放射線のRBE

同じ強さの放射線が空気を通過して 1r の作用があると，それは生物体の軟組織にたいしてちょうど1rad の作用がある。このために空中のイオンを測って，その放射線の生物体への影響を知ることができる。

放射線の生物体への影響を考えるときには，単に吸収線量だけでは不充分である。生物体への影響は，放射線の種類によって異なるからである。この違い方をあらわす数値を RBE (relative biological effectiveness) という。

rad に RBE をかけたものを rem (roentgen equivalent man) とよび，これによって生物体への影響を考えている。〔8-1表〕は種々の放射線の RBE の値である。X-線，β-線などの RBE を1とすれば，速い中性子や α-粒子では5くらいの大きさになり，重い原子核ではさらに大きくなる。1 rem の 1000 分の 1 を 1 mrem という。

§3　放射線の利用

放射性同位元素は，その化学的性質は他の同位元素と変らない。放射性の元素がいろいろな物質，たとえば生物体の中に入っても，生物体からみれば，放射性を持たないふつうのものと区別しないし，また区別できない。しかも，放射性元素は崩壊するときに放射線を出すので，「自分はいまここにいる」とはっきりと知らせてくれる。放射線の感度は非常に高いもので，β-線や α-線のときには，放射性元素の一つ一つを数えることができる。これらの

性質を利用すると，放射性同位元素が利用できない時代にはまったく不可能であった測定を行なうことができる。

トレーサー 放射性元素の性質を利用すると，植物に肥料を与えるときに，きのう与えたものときょう与えたものとを区別して追跡することができる。たとえば，植物の根の近くに燐酸肥料を与えるとしよう。燐酸は植物に吸収されていくであろうが，もともと植物の中に燐酸があるから，以前からあるものと新しく与えた燐酸とを区別することはできないから，きょう土地に入れたものがどんな速さで，どこまで吸収されていくかを知ることは不可能である。ところが，放射性の燐，つまり ^{32}P（半減期15日，β-線のエネルギーが約 1 MeV）を含む燐酸を与えるとしよう。この燐酸は，^{32}P が崩壊して β-線を出せばその存在を知ることができるが，崩壊する前はふつうの燐酸とまったく変らない。そこで，植物の近くの土地に ^{32}P を含む燐酸を入れると，それが土地の中を通って根に吸収され，茎から葉に移っていく速さを知ることができる。茎や葉の部分に，ガイガー計数管を近づけて β-線の数を測ればよいのである。これによって，土地から根に移る速さ，茎を通って枝や葉に移るときに茎に滞在する分量などを知ることができる。植物の体の中を化合物が移動するありさまを学問的に知ることができるとともに，実用的にも肥料の与え方についてよい方針を得ることができるわけである。このような方法は放射性元素の性質を利用して元素の行方を追跡するので，「トレーサー」の方法といっている。

トレーサーの方法は，動物体にも利用できる。放射性のナトリウム ^{24}Na（半減期15時間，β-線のエネルギー約 1 MeV）を含む食塩水を飲むとしよう。このときに，手をガイガー計数管に近づけておけば，飲んだ食塩水が消化器で吸収されて血液に入り，心臓を通って手までまわってくるようすを知ることができる。

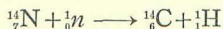
また，放射性の酸素 ^{15}O（半減期2分，β-線は陽電子で，これが

0.5 MeV の γ-線に変って，放出されるのでこれを検出できる）を使うと肺の活性度を知ることができる。^{15}O を含む空気を呼吸したときに，肺が正常で酸素をとり入れれば，肺から γ-線を検出できる。とり入れなければ，酸素を排出してしまうので，肺が出す γ-線が少ない。この方法は肺の病気の診断に使われている。

これらの方法で注意しなければならないことは，放射性元素は自分の半減期にしたがって自由に崩壊するのであって，ガイガー計数管の近くで特に多く崩壊するということはない。ガイガー計数管の近くあるいは他の場所で崩壊してとび出した電子が，植物や動物の組織の働きを変化させては困るわけである。実際には，弱い放射能を使って，それによって組織が影響をうけることがほとんどないようにしている。そのくらいに放射能を弱くしても，測定の目的は充分に達することができるわけである。

古年代測定　植物の中の炭素の同位元素は ^{12}C と ^{13}C であるが，このほかに微量の ^{14}C が含まれている。これは半減期 5580 年の放射性同位元素である。そして約 0.1 MeV の β-線を出す。これが植物体の中にあるのは，同化作用で空中からとり入れる二酸化炭素の中にわずかであるがきまった分量の ^{14}C があるからである。

空中で ^{14}C ができるのは，宇宙線の中の高エネルギー中性子が窒素にぶつかって，次の反応によって，いつも ^{14}C を作っているからである。

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

かくして作られる ^{14}C は，作られるものと，崩壊してなくなっていくものとが釣り合って，いつも同じ割合になっている。したがって，植物体の中の ^{14}C の割合は，場所によっても年代によっても変らない。

ところが植物が切りとられて同化作用をやめると，その中の ^{14}C の割合は半減期にしたがって減少していく。つまりある木材の中の ^{14}C の割合がふつうの場合の半分になっていれば，切りと

られてからちょうど5580年経過しているわけである。半分でなくても，^{14}Cの割合の減少のありさまから木材などの年代を知ることができる。この方法は考古学に大きな貢献をしている。たとえばエジプト王朝時代の木材の年代を測定して4000年以前のものであることを知ることができる。また最近神奈川県の貝塚の縄文土器の近くにあった麦粒について測定して，8000年以前のものとされたことも有名である。

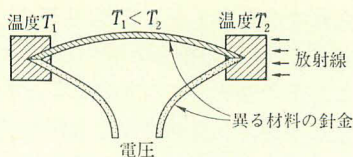
適当な放射性同位元素を用いると，地球や隕石の年代を推定することができる。その例は^{238}Uと^{206}Pbを用いるものである。^{238}Uは崩壊を重ねて，おしまいには^{206}Pbになる。^{238}Uの半減期は非常に長く4.9×10^9年である。そこで，ウラニウムと鉛を含む鉱石があって，はじめは鉛がまったく存在しなかったとすれば，^{238}Uと^{206}Pbの割合をしらべ，たとえばちょうど同じになっていれば，鉱石が生まれてから^{238}Uの半分が^{206}Pbになり，半分が^{238}Uのまま残っているわけであるから，4.9×10^9年経過していることになる。

しかし生まれたときに鉛を含まないことが明らかな鉱石は少ない。そこでウラニウムを多く含む鉱石と少なく含む鉱石の中の^{206}Pbの存在比をくらべて，いろいろな鉱石の年代を推定する。^{206}Pbは〔3－38図〕に示した質量分析計で鉛の同位元素を分けてその存在比をきめるのである。

実際は，海底の土の中の鉛について同位元素を分析し，ウラニウムの少ない隕石の中のそれと比較して，地球の年代として4.5×10^9年という値が推定されている。つまり地球上の化合物が現在のありさまになってから約45億年たっているというわけである。

原子力電池　核分裂片が核燃料の中を走ってその温度を上げるように，放射性同位元素から出るα-線などの放射線が物質の中を走ると温度が上る。ただ，トレーサーや古年代測定に利用され

る放射能は弱いもので，それによる温度上昇はきわめてわずかのものである。

しかし，放射能が強くなると，放射線による発熱は目立つものになる。たとえば，

8-2図 熱電対によって電圧を作る

^{238}Puが1キューリーあったとしよう。^{238}Puは^{239}Puと違って，核分裂は行なわないが，半減期が86年で，約5.5 MeVのα-線を出して崩壊する。1秒間に1キューリーの^{238}Puが出すエネルギーは，

$$3.7\times10^{10}\times5.5\,\mathrm{MeV}/秒 = 3.3\times10^{-2}\,\mathrm{Watt}$$

となるから100キューリーを用いると3.3Wを出すことができる。

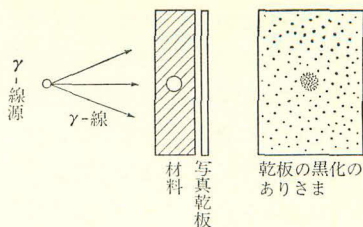
この熱を電気に変換するためには，〔8-2図〕のような熱電対を使う。熱電対は異なる材料の針金を組み合わせ，二つの接点の温度を変えると電圧が出てくるものである。一方の接点をかこむ物質に放射線をあてて，その温度を上げるわけである。このような装置を原子力電池とよんでいる。用いる放射性同位元素は^{238}Puとは限らない。^{90}Srなども用いられる。

原子力電池は離島や通信衛星の電源などに使われてきたが，昭和44年11月に米国が月に送ったアポロ12号が月面に残す観測装置の電源に用いたのは^{238}Puを使ったものである。

原子力電池は原子核が自発的にエネルギーを放出するものを利用するのであって，可動部分も調節部分も必要がなく，原子炉にくらべれば，きわめて簡単な構造であるために，通信衛星や月面で使用することができるのである。

透視 γ-線は物質を通過する能力が大きいので，材料の内部欠陥を発見するために利用される。〔8-3図〕のように，材料にγ-線をあて，反対側に写真乾板をおく。乾板を現像して黒化が一様ならば，内部に欠陥はない。黒化の不均一を見て，欠陥を発見す

ることができる。

X-線による体の検査は，原理はこの方法とまったく同じである。γ-線はエネルギーが高くて通過能力が大きいので，厚い鉄などの検査にも使われている。このときのγ-線は加速器を使って人工的に作ることも多い。しかし，^{60}Co などを使う人工放射性元素の出すγ-線では，装置を簡単にどこへも持ちはこびできる特長がある。野外におけるレールの熔接部の検査や仏像の内部の検査によく使われている。

8-3図 材料内部の欠陥をしらべる

また放射線が通過する度合いから，ものの厚さを測定することができる。通過能力の大きいγ-線は鉛などの厚さの測定に，通過能力の小さい β-線は紙などの厚さをきめるのに使われている。

§4 放射線による物質の変化

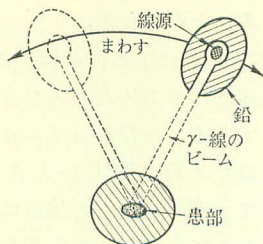
物質はすべて原子があつまって作られていて，その結合の例を〔2-17図〕に示した。物質の中の原子のならび方は，原子一つ一つの性質がきめている。かくて物質の性質は，原子一つ一つの性質と，そのならび方によって決定されている。このことは有機，無機の無生物から，動物，植物体まで同じである。動物の遺伝物質でも事情は同じである。

一般に，このような物質の中を放射線が通ると，原子の性質が変化し，そのならび方が変化して物質の性質が変化する可能性がある。この変化は無生物にも生物にも起るが，よい方向に変化するときと，悪い方向に変化するときがある。

医療への利用 放射線が人体の組織にあたると，概して害を与える。しかしガンのような有害な細胞にあててこれを死滅させる

ことができれば，はなはだぐあいがよいわけである。ただし，ガン細胞にだけ放射線をあてて他の健康な部分にはあてないことが望ましいが，完全にそれを実施することはできない。

8-4図　γ-線による深部治療

皮膚ガンならば，β-線を表面からあて，治療することができる。胃ガンなどのように体の内部の場合にはγ-線を用いる。患部に放射線が集中するようにするためには，γ-線をビーム状に出し，〔8-4図〕のようにビームを回転させる。このγ-線としては図のように放射性同位元素が発生するものを利用することもあるが，ベータートロンとか線型電子加速器によって加速されたものを利用することも多い。

特殊なガンには速い中性子が有効とされ，それを発生するためのサイクロトロンの建設が計画されている。

外部からγ-線や中性子をあてるのでなくて，次のような方法もある。たとえば甲状腺は沃度をあつめる性質がある。そこで ^{131}I (半減期8日，約1MeVのβ-線を出す）を含む食物を食べると，これが甲状腺にあつまる。バセドー氏病のように甲状腺の機能が異常になっているときには，β-線の働きによって治療することができる。

治療ではないが，肉などの中の細菌を放射線によって殺し，温度を上げないで殺菌することが可能である。また，ジャガイモなどにあてると，その発芽を押えることができる。

突然変異　動物や植物の遺伝素質をきめている生殖細胞に放射線があたって，その性質を変えると，素質の突然変異が起る。この現象は1927年頃からX-線を用いて研究され，ショウジョウバエにX-線をあてると多くの突然変異が認められた。また，小麦などの農作物でも，X-線によって変種を作ることができ，菜種，

砂糖，大根，菊などの変種が作られている。現代では，^{60}Coなどを用いて，多量のγ-線を利用することができるようになり，変種の研究はますます盛んになってきた。種子ばかりでなく，成長中の植物にもγ-線をあてるために特に作られた農場を「ガンマフィールド」とよんでいる。

突然変異では，丈夫でわれわれに都合のよい性質を持つものばかりができるわけではない。弱くて，悪い性質を持ったものもできる。しかし，丈夫でわれわれに都合のよい性質を持つものを育て，その性質が子孫に伝わるように定着したものを利用するわけである。

放射線化学　医療や突然変異は生物に関することであるが，無生物に放射線があたったときの性質の変化を研究する分野を放射線化学とよんでいる。

放射線化学は工業生産に関係を持っている。というのは，放射線をあてることによって性質のすぐれた材料を作り出すことができるからである。もともと放射線があたると，物質の性質は悪くなることが多い。原子炉の中の支持材料などが放射線によって劣化するとぐあいが悪いので，どのように劣化するか，あるいは劣化の少ない物質は何かという研究が必要である。

しかし，突然変異によってすぐれた性質の動植物が生み出される可能性があると同じように，無生物でも，放射線があたることによって性質が改善される可能性がある。その代表的なものはポリエチレンである。われわれがふつう利用しているポリエチレンは熱に弱く，80°Cくらいで軟化する。しかし放射線をあてたものは熱に強くなって，使いやすいものになる。このことはすでに工業的に利用されている。このような放射線の工業応用の例は増加しつつある。

§5　放射線と人体保護

これまで述べたように，放射線は，われわれの生活や自然科学の研究に利用される。利用の面が広くなると，研究者や一般の人が放射線にあたる場合が多くなるので，人体にあたる放射線の限度をきめ，このくらいならば無害であるとか，このくらいならばやむを得ないという限度をきめることが必要になってくる。

もともと，宇宙線が宇宙から地球に飛び込んでいて，この放射線の影響はだれでも，また，われわれの祖先のすべてがうけてきている。また，地上にもある程度の自然放射能があり，この影響をうけるのもやむを得ない。今世紀のはじめから X-線が利用されるようになり，はじめはこれを研究や医療に利用する人の中には，多量の X-線をうけて，その影響をうけた人もあった。しかしこれらは限られたわずかの人たちであって，一般の問題にはならなかった。ところが現在のように，原子力の利用が拡大してきて，放射線に関係する人が増加すると，人体にあたる放射線を制限することが社会的に必要になってきた。そうしないと研究や工業生産が遂行できなくなるからである。

このためにとりきめられる線量を「許容線量」という。許容線量は個人の体がうける影響を考えて個体を対象とする場合と，遺伝に対する影響を考えて集団に対する総量または平均を考える場合とを分けて考える。個体に対する放射線の影響には，ある値より少ないと影響がほとんどあらわれない「しきい値」がある。また，一度影響をうけても，時間がたつと恢復する性質がある。たとえば一時に 400 rem の放射線を浴びれば 50 % の割合で死亡するが，これを 10 年間に分けて 1 年に 40 rem ずつ浴びると，のちに述べる法律による許容量を越えてはいるが，目につくような障害は起らないであろう。

集団に対する線量では遺伝的影響を考える。遺伝に対する影響

では，「しきい値」もなく，恢復作用もなく，それまでに個人がうけた全線量が問題であるとされている。そのために個人に対する影響を考える場合よりも厳重にするべきとも思われる。しかし生殖は個人でなく，相手があって行なわれ，生殖のときの一対の両方が相当の放射線の影響をうけたときに遺伝効果があらわれるために，集団がうける平均的線量が問題である。そのために許容線量は個人に対するものとあまり変らないものになる。

われわれはいつも宇宙線などによる自然放射線をうけていて，年間 100 mrem くらいになる。また胸部や歯の診断のためにX-線が使われている。この線量は相当に大きいものであるが，宇宙線によるものは避けることができないのと，X-線による診断は人間の生活に欠くことのできないものとして，これらは「許容線量」には含めないで別扱いとしている。

許容線量　放射線を浴びることを「被曝」といっている。被曝を外部被曝と内部被曝の二つの場合に分ける。外部被曝は γ-線や中性子のような放射線が，外部から人体に到達して体の中に侵入する場合である。内部被曝は放射性同位元素が体内に入って，体内の各部分で放射線を放出して被曝する場合である。

許容線量は法律によってきめられているが，法律は国際放射線学会に属する国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection, ICRP と略す）の勧告にそってきめられている。ICRP の勧告（1962年）は次のようである。まず，職業人とその他の人に分ける。職業人は原子炉，加速器などの放射線施設で働く人である。その他の人のうちには放射線施設に関係のない一般人と，一般人と職業人の中間で，ときどき放射線施設に出入りする特殊グループがある。

まず個人被曝だが，職業人については次のようにする。年齢 N 歳までに浴びる線量 D を次のもの以下とする。

$$D = 5(N-18) \qquad \langle 8\text{-}6\,式\rangle$$

D は rem で測る。18 歳までは放射線作業につくことを禁止されている。18 歳以後は 1 年 5 rem を限度とすることになる。ICRP はさらにこれに条件をつけて，任意の引き続いた 13 週間（1/4年）に 3 rem 以下とすることを勧告している。これらの線量は生殖腺，造血臓器についてとりきめたもので，他の部分については，これより多い線量があたってもよいとされている。たとえば皮膚に対しては 13 週間に 8 rem までよい。

次に放射線施設にときどき出入りする特殊グループについては，〈8 - 6 式〉の分量の 1/3 を限度とする。

さらに一般人に対しては〈8 - 6 式〉の 1/10 を限度とする。

実際に被曝量を制限するときにも 1 年間とか 13 週という期間は長すぎるので，ふつうには 1 週間にうける線量を目安として安全を保っていく。1 年間を 50 週として，職業人は 1 週に 0.1 rem ＝100 mrem を，ときどき放射線施設に出入りする特殊グループについては 1 週に約 30 mrem を，一般人については 1 週に 10 mrem を限度とする。施設の周辺の線量の実際の運営についてはこの規準よりも少ない線量に抑えているのがふつうである。

放射線にあたったときの白血病発生の資料としては次のものがある。年間 1 rem ずつ連続してあたると，年間 10 万人に 5 人程度の発生があるとされ，これは，自然に白血病が発生する割合と同じくらいである。年間 1 rem は 1 週間 20 mrem の線量であって一般人の許容量の 2 倍である。

次に遺伝に関係して，集団の個人が平均でうける許容線量について，ICRP の勧告の一例は次のようである。30 歳までにうける線量を全人類について平均をとったものが 5 rem を越えないようにする。このときに自然放射能は除くことにする。いま人類のうち x% の人が放射線従事者になったと仮定して 18 歳から 30 歳までの 12 年間に年間 5 rem という許容被曝の最大限をうけたと仮定しよう。そして他の人は自然放射能以外に放射線にあ

たらなかったとすると，これらの人の線量はゼロである。このときに全人類の平均線量は，

$$5\times12\times\frac{x}{100}+0\times\frac{(100-x)}{100}=0.6\,x\text{ rem}$$

となる。これが集団の個人がうける平均の許容線量の5 remになるために $x=5/0.6\div8$ %となる。つまり全人類の8%くらいの人が上記の放射線をあびてもよいということになる。

水と空気の許容濃度　〈8-6式〉の許容線量は外部被曝と内部被曝を加えたものである。外部被曝は人体の近くに放射線検出器を置いて推定する。内部被曝は空気，食物，飲料水から摂取されるものから推定する。このために，水や空気の中に含まれる放射性同位元素の許容量がきめられている。これもICRPによって勧告されているもので，放射性同位元素が人体の中にどのくらいの期間とどまるか，どの部分にあつまるか，またどのような放射線を出すかによってきめられる。

一般人に対する放射性同位元素の濃度の許容量の一例を〔8-2表〕に示す。この表は一般の人についてのもので，外部被曝がない場合のものであり，職業人に対してはこの10倍になる。外部被曝があれば，その分だけ内部被曝を少なくするべきである。またこの表には水の中の濃度を示しているが，ふつうの食物の中の濃度もほとんどこれと同じに考えてよい。

	許容濃度 μCi/cc	
放射性同位元素	水　中	空気中
^{60}Co	5×10^{-5}	3×10^{-10}
^{55}Fe	8×10^{-4}	3×10^{-8}
^{59}Fe	6×10^{-5}	2×10^{-9}
^{51}Cr	2×10^{-3}	8×10^{-8}
^{90}Sr	4×10^{-7}	4×10^{-11}
^{131}I	2×10^{-6}	3×10^{-10}
^{137}Cs	2×10^{-5}	2×10^{-9}
^{182}Ta	4×10^{-5}	1×10^{-9}

8-2表　放射性同位元素の許容濃度の例（一般人）

環境放射線　人体を保護するための放射線量の規準について述べたが，次に，われわれの環境における放射線はどのようになっているかを述べよう。

	^{90}Sr μCi/cc	^{137}Cs μCi/cc
北海道	5.1×10^{-9}	21.8×10^{-9}
宮　城	4.5　〃	18.0　〃
東　京	8.3　〃	37.9　〃
大　阪	4.2　〃	13.5　〃
福　岡	6.9　〃	13.3　〃

8-3表　牛乳の中の^{90}Srと^{137}Cs(1967年)
(放射能調査研究成果論文抄録集。昭和43年科学技術庁)

まず宇宙線や自然放射能による線量は年間 70～100 mrem である。つまり1週間 2 mrem の程度である。また診療上のX-線被曝は，ある国では年間 150 mrem に達するという。これらを加えると1週間に 5 mrem となる。これは一般人の許容線量の半分になっている。しかし前に述べたように，これらのものは放射線被曝の中に加えない。人工の放射線によるものだけを考えに入れる。そうすると，一般人にとっては放射線の影響はほとんどないといってよい。たとえば原子炉，加速器のような放射線施設の周辺に住む一般人についても，法律による1週間 10 mrem よりはるかに少ない線量，たとえばその 1/3 とか 1/10 に抑えられていて，自然放射能や医療のものと同程度か，それ以下になっていて問題にならない。また職業人でも放射線管理が厳重で，法律の上限まで浴びる例はきわめて少ないのが実状である。

大部分の人は放射線施設から遠く離れて生活している。これらの人達にとっては，食物から入る内部被曝の方を気にすべきであろう。食物の例を牛乳にとって，その中の ^{90}Sr と ^{137}Cs の濃度を〔8-3表〕に示した。1967 年の日本の5箇所での測定を示したもので，〔8-2表〕の ICRP の勧告による許容濃度にくらべると，^{90}Sr で100 分の 1，^{137}Cs で 1000 分の 1になっている。安全からいえば問題にならない分量である。しかし〔8-3表〕は 1967 年のもので，アメリカ，ソ連が協定によって空中の核爆発を実施しなくなってから数年たってからのものである。これについては 1960 年頃からの変化を見るのは参考になる。

〔8-4表〕は日本における ^{90}Sr の降下量の年変化を示してい

る。単位は1 km² に降下するものを mCi であらわしてある。1962～1964年には多いが，1965年から目立って減少している。降下した ^{90}Sr は作物に吸収され，いろいろな食物に入るわけである。しかし，〔8-3表〕の牛乳は1967年のもので，それ以前の何年間かの降下物の影響をうけたものであろう。^{90}Sr の降下量が〔8-4表〕のように減少すれば，牛乳の中の ^{90}Sr は将来減少すると期待される。

年	札 幌	東 京	福 岡
1960	2.0	2.7	2.6
1961	2.2	1.7	2.8
1962	10.6	8.1	12.4
1963	21.3	19.3	20.0
1964	17.4	9.4	8.7
1965	3.8	3.3	3.8
1966	2.3	1.9	1.9
1967	1.0	0.7	1.0

8-4表 ^{90}Sr の年間降下量（mCi/km²）
（放射能調査研究成果論文抄録集）。昭和43年科学技術庁）

〔8-5表〕は北太平洋の西部の表面海水の中の ^{90}Sr と ^{137}Cs の濃度の年変化を示したものである。1957～1959年には多いが，そのあとは減少している。北太平洋西部で行なわれた核爆発の減少によるものであろう。濃度が大きいときといっても〔8-2表〕の許容濃度の100分の1，または1万分の1である。

年	^{137}Cs(μCi/cc)	^{90}Sr(μCi/cc)
1957	9～48 ×10^{-10}	6～23 ×10^{-10}
1958	4～33 〃	2～31 〃
1959	2～26 〃	3～23 〃
1960	2～9 〃	1～5 〃
1961	2～5 〃	2～4 〃
1962	2～7 〃	2～5 〃
1963	2～9 〃	2～6 〃
1964	2～9 〃	2～7 〃
1965	2～6 〃	2～5 〃
1966	2～5 〃	2～4 〃
1967	2～4 〃	2～3 〃

8-5表 北太平洋西部表層海水中の ^{137}Cs, ^{90}Sr の濃度の時間変化
（三宅泰雄著「核兵器と放射能」による）

牛乳や海水の放射能の濃度を見ると，いまのところ，人工放射能は人体に大して影響がないとみえる。しかし，もう少し心配した方がよい点もある。牛乳は土地から草を通り，さらに牛の体内を通ったもので，直接われわれが飲むものである。しかし海水はわれわれが直接に飲むものでなく，直接に食べるのは魚である。

	^{60}Co	^{55}Fe	^{59}Fe	^{51}Cr	^{182}Ta
半　減　期	5.2年	2.9年	45日	27日	112日
許容濃度 μCi/cc (ICRP)	5×10^{-5}	8×10^{-4}	6×10^{-5}	2×10^{-3}	4×10^{-5}
濃縮係数	200〜10,000	10〜1,000	10〜1,000	12	5
海水の許容濃度 μCi/cc	10^{-7}〜10^{-9}	10^{-4}〜10^{-6}	10^{-5}〜10^{-7}	10^{-4}	10^{-5}
一次冷却水の濃度（推定） μCi/cc	3×10^{-2}	1×10^{-2}	3×10^{-3}	6×10^{-3}	7×10^{-2}

8-6表　原子力潜水艦の一次冷却水の放射能
（三宅泰雄著「核兵器と放射能」より）。

海水の中の濃度と，その中で育った魚の中の放射能の濃度は同じではないはずである。魚の中では一般に濃縮されるのである。

〔8-6表〕はこれについてのもので，三宅泰雄氏の著書から引用した。表には濃縮係数を示してあるので，魚を食べるときに人体を守るためには海水の許容濃度は下から2段目に示すように低いものになる。これは ICRP の許容濃度を濃縮係数で割ったものである。一方，最下段は原子力潜水艦の一次冷却水の中の放射能の推定濃度である。原子力潜水艦では，推進のために〔6-18図〕のような加圧水型発電炉と同じ形式の原子炉を使っていて，炉心と熱交換器を循環する加圧された水が一次冷却水である。始動するときに温度の低い状態から加圧された高い温度になり，その際に膨脹する分を機構上やむを得ず排出するという。この分量は1トンまたは2トンとされている。

〔8-6表〕を見ると，排出される一次冷却水の濃度は ICRP の許容濃度と 10^2〜10^3 くらい違うだけである。しかし濃縮係数を考えた海水の許容濃度とはかなりに大きい違いがある。排出された一次冷却水は，多量の海水によって薄められて，はじめて安全になる。一次冷却水の濃度と濃縮係数を考えた許容濃度の比は，〔8-6表〕では，大きい場合に 3×10^6 である。潜水艦の始動時に

排出される一次冷却水の分量を2トンとすれば，これを6×10^6トンにうすめればよい。一辺が200 mの海水が8×10^6トンであるから，一次冷却水が数100 mの範囲に一様にひろがればよいことになる。

一方，このようなことを考えるときに，濃縮係数がほんとうにどのくらいかを科学的に決定することが大切である。また，人が主としてたべる肉の部分にどれだけ濃縮されるかも問題である。このために科学技術庁では，最近放射線医学研究所に，臨海実験場を作った。この実験場は茨城県にあり，あらかじめわかった濃度の放射能をもつ海水で魚を育て，放射能が魚の体に濃縮されるありさまを実験的に研究するということである。

放射線はすでに述べたように，工業生産にも研究にも有用な役目を多量に果している。一方，人体を放射線から保護する必要があることはいうまでもない。その際に事実に対して科学的認識を深めることが必要であろう。その上に立って人類全体の幸福のために結論を出すべきである。

参考文献

〈一般向け参考書として〉

伏見康治著『原子力のゆくえ』1954年・朝日新聞社

武田栄一著『原子炉――原理と構造』1956年・日刊工業新聞社

原沢進著『原子力の基礎』1962年・コロナ社

M・B・ネイマン著（小林茂樹訳）『原子力入門』1964年・東京図書KK

田中好雄著『原子力産業の話』1969年・日本経済新聞社

三宅泰雄著『核兵器と放射能』1969年・新日本出版社

B・L・コーエン著（熊谷寛夫・和田雄訳）『原子の心臓』1970年・河出書房新社

〈参考にした専門書〉

P・C・パトナム著（吉崎英男訳）『エネルギー問題の将来』1955年・商工出版

S・グラストン著（金関義則・服部学訳）『原子力ハンドブック・原子炉篇（上）』1956年・商工出版

S・グラストン著（金関義則・野上燿三・服部学訳）『原子力ハンドブック・原子炉篇（下）』1956年・商工出版

S・グラストン著（武谷三男・服部学訳）『原子力ハンドブック・爆弾篇』1958年・商工出版

G. R. Keepin; Physics of Nuclear Kinetics, 1965, Addison-Wesley Publishing Co.

S. Glasstone & R. H. Lovberg; Controlled Thermonuclear Reactions, 1960, D. Van Nostrand Co.

索　引

（太字は定義・内容説明のある頁）

キ

ク

ケ

コ

サ

シ

ノ

ハ

ヒ

フ

ヘ

ホ

マ

ミ

ユ

ヨ

ラ

リ

ル

レ

ロ

ワ

原子力

熊谷寛夫（くまがいひろお）

1911年長野県に生まれる。1934年東京大学理学部物理学科卒。阪大東大にて中性子と原子核の相互作用の研究を行なう。原子核研究のためにサイクロトロン等の加速器を建設し，第2回藤原賞受賞。著書「近代電磁気学」「真空の物理と応用」

昭和45年7月21日　初版第1刷発行

著者　©熊谷寛夫
発行者　竹之内静雄
発行所　筑摩書房
東京都千代田区神田小川町2－8
Tel (291)7651　振替東京　4123
郵便番号　101-91

印刷　三松堂印刷　製本　大口製本

(分類)1342(製品)03215(出版社)4604

＊

筑摩総合大学刊行にさいして

学問は今日、一つの転期にある。めざましい専門科学の発展、現実問題の多様化に伴い、かつての学問体系の有効性はゆらぎ、学問分野の地図は大きく書きかえられつつある。その最も顕著な特質は、専門科学の相互交流と総合化への趨勢であろう。本叢書は、その今日的状況と将来への展望に立って、現代学問の全分野を総合的・体系的に捉えなおし、あるべき新しい学問体系の見取り図を構築しようとするものである。更にまた、専門知識がますます重視される社会要請をふまえ、普遍的教養と専門知識の統一をはかることを目的とする。専門知識が最も力を発揮しうるのは、それをとりまく諸科学の全体的な体系の把握の上であると考えるからである。学問の場としての大学が根底から問い直されている今日、学問のあり方、大学のあり方に対して積極的な提言を試みる本叢書を、独自の総合アカデミアとして広く志ある人々に提供したい。

＊

装幀　粟津潔

CU 筑摩総合大学

（分類）1342（製品）03215（出版社）4604